

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**AUTONOMNÍ A DISPEČERSKÉ ŘÍZENÍ  
DISTRIBUOVANÝCH ZDROJŮ V DISTRIBUČNÍ SÍTI VN**

AUTONOMOUS AND DISPATCHING CONTROL OF DISTRIBUTED POWER GENERATING PLANTS  
OPERATED IN THE HV DISTRIBUTION SYSTEM

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jiří Dvořáček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Jiří Dvořáček

**ID:** 195484

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

**Autonomní a dispečerské řízení distribuovaných zdrojů v distribuční síti VN**

## POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Autonomní řízení zdrojů s připojením do VN v souladu s požadavky na výrobní moduly/zařízení dle EN 50549-2 a směrnice RfG
2. Koncepce a infrastruktura dispečerského řízení výrobních zařízení ve VN
3. Implementace variantního modelu autonomního řízení VN zdrojů s integrací dispečerské vrstvy v PSCAD
4. Sestavení numerického modelu realistické testovací VN sítě se zdrojem/zdroji a provedení parametrických simulací
5. Identifikace a ověření funkční koexistence a koordinace módů řízení zdrojů s dispečerským řízením VN soustavy

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Práce se zaměřuje na zhodnocení možností řízení decentrálních výroben na úrovni vysokého napětí. První část práce zahrnuje rozbor distribuční soustavy a rozbor možností autonomního řízení a dispečerského řízení dle RfG, ČSN EN 50549-2 a národní implementace PPDS. Další části popisují tvorbu modelu pro simulaci nesynchronní výroby a části soustavy v prostředí PSCAD pro simulaci ustálených chodů a části dne. Poslední část práce je věnována zhodnocení možností řízení výroben a kompatibilitu autonomního a dispečerského řízení.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

distribuční soustava, PSCAD, autonomní řízení, dispečerské řízení, vysoké napětí, simulace, fotovoltaické, decentrální výroba, power control

## **ABSTRACT**

Theses focuses on the evaluation of the possible means of active and reactive power control of generating units connected to medium voltage. First part summarizes analysis of Czech Republic medium voltage distribution grid. It summarizes means of autonomous and dispatcher control of generating units with respect to European Commission directive RfG, standard ČSN EN 50549-2 and national implementation PPDS. Following parts provide description of generating unit and distribution grid models used for simulation in PSCAD. Last part focuses on evaluation of results obtained via simulating steady-state scenarios as well as continuous simulation.

## **KEYWORDS**

distribution network, PSCAD, autonomous control, dispatcher control, medium voltage, simulation, photovoltaic, decentralized generation, power control



DVOŘÁČEK, Jiří. *Autonomní a dispečerské řízení distribuovaných zdrojů v distribuční síti VN*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2021, 176 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Jiří Dvořáček  
**VUT ID autora:** 195484  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2020/21  
**Téma závěrečné práce:** Autonomní a dispečerské řízení distribuovaných zdrojů v distribuční síti VN

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D., za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. V neposlední řadě velmi děkuji své rodině a přítelkyni za podporu při studiu.

# Obsah

Seznam zkratek	11
Seznam symbolů	12
Úvod	21
<b>1 Stávající situace distribuční soustavy na hladině vysokého napětí</b>	<b>23</b>
1.1 Vedení vysokého napětí . . . . .	23
1.2 Napáječ z hladiny 110 kV . . . . .	24
1.2.1 Transformátor 110/22 kV . . . . .	25
1.3 Zatěžování sítě VN . . . . .	25
1.4 Koncepce koordinace napětí . . . . .	26
1.4.1 Transformátor s přepínáním odboček pod zátěží . . . . .	29
1.4.2 Zvýšení počtu napájecích stanic . . . . .	30
1.5 Současný stav připojených výroben . . . . .	31
1.5.1 Uspořádání výroben . . . . .	31
1.6 Výkonová znaménková konvence . . . . .	33
<b>2 Cíle práce</b>	<b>35</b>
<b>3 Autonomní řízení zdrojů s připojením do VN v souladu s požadavky na výrobní moduly/zařízení dle EN 50549-2 a směrnice RfG</b>	<b>36</b>
3.1 Kategorie výrobních modulů dle RfG . . . . .	36
3.2 Provoz při normálních provozních podmínkách . . . . .	37
3.2.1 Provozní rozsah frekvence . . . . .	37
3.2.2 Požadavky výroby činného výkonu při poklesu frekvence . . .	38
3.2.3 Provozní rozsah napětí . . . . .	39
3.3 Odolnost proti poruchám . . . . .	39
3.3.1 Odolnost proti rychlosti změny frekvence (ROCOF) . . . . .	40
3.3.2 Překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí (UVRT) .	40
3.3.3 Překlenutí poruchy při krátkodobém nadpětí (OVRT) . . . . .	41
3.4 Odezva činného výkonu na změnu frekvence . . . . .	42
3.4.1 Výkonová odezva při zvýšené frekvenci . . . . .	42
3.4.2 Výkonová odezva při snížené frekvenci . . . . .	44
3.5 Odezva výkonu na změnu napětí . . . . .	45
3.5.1 Podpora napětí změnou dodávky jalového výkonu dle RfG . .	45
3.5.2 Podpora napětí změnou dodávky jalového výkonu dle EN 50549-2 . . . . .	47

3.5.3	Rozbor možností podpory napětí řízením jalového výkonu . . .	51
3.5.4	Snížení činného výkonu při zvýšení napětí sítě . . . . .	52
3.6	Požadavky na ochrany výrobních modulů . . . . .	53
3.7	Implementace autonomních řídicích funkcí výroben ve VN dle požadavků PDS . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Koncepce a infrastruktura dispečerského řízení výrobních zařízení ve VN</b>	<b>56</b>
4.1	Dispečerské řízení v distribuční soustavě ČEZ Distribuce . . . . .	57
4.1.1	Výrobní do 100 kW . . . . .	57
4.1.2	Výrobní s výkonem nad 100 kW . . . . .	58
4.2	Dispečerské řízení v distribuční soustavě EG.D . . . . .	58
4.3	Infrastruktura dispečerského řízení . . . . .	59
4.4	Koncept integrace autonomního a dispečerského řízení . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Implementace variantního modelu autonomního řízení VN zdrojů s integrací dispečerské vrstvy v PSCAD</b>	<b>62</b>
5.1	Struktura parametrizace . . . . .	63
5.2	Externí řízení . . . . .	67
5.3	Popis vybraných vlastních bloků využívaných v ostatních řídicích funkcích modelu výroby . . . . .	69
5.3.1	Vyhledávací tabulka (LUT) . . . . .	69
5.3.2	Limitace nárůstu/poklesu . . . . .	70
5.3.3	Antiwindup řešení pro integrátor . . . . .	71
5.4	Měření . . . . .	72
5.4.1	Měření frekvence . . . . .	74
5.4.2	Měření elektrického proudu . . . . .	75
5.4.3	Měření elektrického napětí . . . . .	77
5.4.4	Výpočet výkonu . . . . .	79
5.5	Blok inicializace a ochrany a ROCOF ochranná funkce . . . . .	83
5.5.1	Protection processor . . . . .	83
5.5.2	ROCOF protection . . . . .	85
5.6	Řízení činného výkonu . . . . .	87
5.6.1	Funkce $P(U)$ . . . . .	87
5.6.2	Externě žádaná hodnota výkonu . . . . .	87
5.6.3	Funkce $P(f)$ . . . . .	90
5.6.4	Regulátor činného výkonu . . . . .	91
5.7	Řízení jalového výkonu . . . . .	92
5.7.1	$Q(U)$ alternativní zadání . . . . .	95

5.8	Limitace jalového výkonu . . . . .	96
5.8.1	Charakteristika do „V“ . . . . .	97
5.8.2	$Q(P)$ oblast . . . . .	97
5.9	Nastavení proudu výroby . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Sestavení numerického modelu realistické testovací VN sítě se zdroji</b>	<b>102</b>
6.1	Napáječ ze sítě 110 kV . . . . .	103
6.1.1	Parametrizace pro simulace ustáleného chodu . . . . .	103
6.1.2	Parametrizace pro denní simulace . . . . .	104
6.2	Model vedení . . . . .	105
6.2.1	Parametrizace . . . . .	105
6.3	Transformátor . . . . .	106
6.3.1	Parametrizace . . . . .	106
6.3.2	Hladinový regulátor (HRT) . . . . .	107
6.4	Model zátěže . . . . .	112
6.4.1	Parametrizace pro simulace ustáleného chodu . . . . .	113
6.4.2	Parametrizace pro denní simulace . . . . .	115
6.5	Parametrizace výroby . . . . .	117
6.5.1	Parametrizace funkce $P(U)$ . . . . .	119
6.5.2	Parametrizace dostupného jalového výkonu – $Q(P)$ oblast . . . . .	120
6.5.3	Varianty parametrizace funkce $Q(U)$ pro simulaci UCH . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Simulace ustálených chodů</b>	<b>123</b>
7.1	Automatizace simulace . . . . .	124
7.2	Zhodnocení výsledků . . . . .	125
7.2.1	Volba příslušných charakteristik pro DŘ zadáváním $\cos \varphi$ . . . . .	125
7.2.2	Zhodnocení charakteristik při maximálním výkonu výroby . . . . .	125
7.2.3	Zhodnocení charakteristik v závislosti na disponibilním výkonu . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Simulace průběhu části dne</b>	<b>139</b>
8.1	Výběr vhodné $Q(U)$ charakteristiky . . . . .	140
8.2	Simulace dispečerského řízení . . . . .	140
8.3	Parametrizace . . . . .	141
8.4	Zhodnocení výsledků . . . . .	142
8.4.1	Zhodnocení napětí v soustavě . . . . .	145
8.4.2	Zhodnocení dle jalového výkonu . . . . .	149
8.4.3	Zhodnocení dle ztrát v soustavě . . . . .	154
<b>9</b>	<b>Zhodnocení možností řízení</b>	<b>156</b>

<b>Závěr</b>	<b>157</b>
<b>Literatura</b>	<b>159</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>164</b>
<b>A Skript vyhledávací tabulky</b>	<b>165</b>
<b>B Skript limitace nárůstu</b>	<b>167</b>
<b>C Skript <math>Q(P)</math> oblasti limitace jalového výkonu</b>	<b>168</b>
<b>D Skript pro modul alternativního zadání <math>Q(U)</math></b>	<b>173</b>
<b>E Model soustavy v PSCADu</b>	<b>175</b>
<b>F Obsah elektronické přílohy</b>	<b>176</b>

# Seznam zkratek

**DS** distribuční soustava.

**DŘ** dispečerské řízení.

**DŘS** dispečerský řídicí systém.

**EMTDC** Electromagnetic Transients with DC Analysis.

**ERÚ** Energetický regulační úřad.

**ES** elektrizační soustava.

**FFT** rychlá Fourierova transformace; Fast Fourier Transform.

**FVE** fotovoltaická elektrárna.

**HDO** hromadné dálkové ovládání.

**HRT** hladinový regulátor transformátoru.

**IQR** mezikvartilové rozpětí.

**LUT** vyhledávací tabulka; lookup table.

**MVE** malá vodní elektrárna.

**NN** nízké napětí.

**OLTC** přepínač odboček při zatížení; On-Load Tap Changer.

**OZE** obnovitelný zdroj energie.

**p.j.** poměrná jednotka.

**PDS** provozovatel distribuční soustavy.

**PI** porporcionálně-integrační, složený z proporcionální a integrační složky.

**PLL** fázový závěs; phase-locked loop.

**PM** přípojně místo.

**PPDS** Pravidla pro provozování distribuční soustavy.

**PPS** provozovatel přenosové soustavy.

**PS** přenosová soustava.

**PSCAD** program PSCAD; Power Systems Computer Aided Design.

**RfG** Requirement for generation.

**ROCOF** časová změna frekvence sítě.

**SaH** Sample and Hold.

**UCH** ustálený chod.

**VJ** výrobní jednotka.

**VM** výrobní modul.

**VM** výrobní modul.

**VN** vysoké napětí.

**VTE** větrná elektrárna.

**ČR** Česká republika.

**ŘJ** řídicí jednotka.



# Seznam symbolů

Veličina	Popis	Jednotka
$B_k$	měrná příčná susceptance vedení	S/km
$I_j$	jalový proud	A
$I_c$	činný proud	A
$I$	efektivní hodnota proudu	A
$P_n$	jmenovitý činný výkon	W
$P_M$	je skutečná kapacita na výstupu v okamžiku dosažení odchylky $\Delta f_1$ nebo maximální kapacita – stanoveno PPS	W
$P_d$	je maximální výkon při účinníku 0,95 nebo jiného, specifikovaného PDS nebo jinou odpovědnou stranou	W
$P_{max-limit}$	maximální dovolený dodávaný výkon při nadfrekvenci	W
$P_{max}$	maximální kapacita; maximální trvalý činný výkon stanovený ve smlouvě o připojení nebo stanovený dohodou mezi provozovatelem soustavy a vlastníkem výrobní, který výrobní modul může vyrobit po odečtení výkonu potřebného pro vlastní spotřebu	W
$P_{ref}$	referenční činný výkon; pro synchronní výrobní moduly: maximální kapacita; pro nesynchronní výrobní moduly: slutečný činný výkon na výstupu v okamžiku, kdy je dosaženo prahové hodnoty frekvence, nebo maximální kapacita jak stanoví provozovatel přenosové soustavy	W
$P_{zat}$	odběrový výkon zátěže	W
$P_{žad}$	žádaná hodnota výkonu	W
$P$	činný výkon	W
$Q_{max}$	aktuální maximální využitelný jalový výkon	var
$Q_{žad}$	žádaná hodnota jalového výkonu	var
$Q$	jalový výkon	var
$R_k$	měrný odpor vedení	$\Omega/\text{km}$
$R$	odpor	$\Omega$
$S_{max}$	maximální zdánlivý výkon	VA
$S_{nT}$	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	VA
$S_n$	jmenovitý zdánlivý výkon	VA
$S$	zdánlivý výkon	VA
$U_n$	jmenovité napětí sítě	V
$U_c$	dohodnuté napětí soustavy	V
$U_{žad}$	žádaná hodnota napětí	V

<b>Veličina</b>	<b>Popis</b>	<b>Jednotka</b>
$U$	elektrické napětí	V
$X_k$	měrná podélná reaktance vedení	$\Omega/\text{km}$
$X$	reaktance	$\Omega$
$\Delta P_0$	ztráty naprázdno	W
$\Delta P_k$	ztráty nakrátko	W
$\Delta P$	změna činného výkonu na výstupu z výrobního modulu, ztráty v soustavě	W
$\Delta U_d$	úbytek napětí ve směru osy d	V
$\Delta U_q$	úbytek napětí ve směru osy q	V
$\Delta U$	úbytek napětí	V
$\cos \varphi$	účinník	-
$\tau$	časová konstanta	s
$\varphi$	fázový posun proudu a napětí	°
$f_1$	prahová hodnota frekvence při provozu při nadfrekvenci	Hz
$f_n$	jmenovitá frekvence soustavy	Hz
$f_{stop}$	dodatečná prahová hodnota frekvence při provozu při nad- frekvenci	Hz
$f$	okamžitá frekvence v soustavě	Hz
$i_0$	poměrná hodnota proudu naprázdno	%
$i$	okamžitá hodnota proudu	A
$p$	okamžitý činný výkon	W
$q$	okamžitý jalový výkon	W
$s$	statika	—
$t_{sim,celk}$	celkový fiktivní simulační čas pro výpočet	s
$t_{stop}$	doba, než dojde k obnovení výkonu na hodnotu před akti- vací funkce snížení výkonu při nadfrekvenci	s
$u_k$	poměrná hodnota napětí nakrátko	%

# Seznam obrázků

1.1	Uspořádání elektrizační soustavy, převzato z [10] . . . . .	23
1.2	Příklady systému uzemnění uzlu transformátoru v distribuční soustavě (DS) na hladině vysokého napětí (VN), převzato z [10] . . . . .	25
1.3	Výkonová křivka pro určení odebíraného jalového výkonu zátěže, převzato z [8] . . . . .	26
1.4	Výpočet úbytku napětí při zanedbání příčných prvků, převzato z [10] . . . . .	27
1.5	Regulace napětí při použití transformátoru s přepínačem odbočky při zatížení (OLTC), převzato z [10] . . . . .	29
1.6	Ilustrace přepínání odbočky, převzato z [28] . . . . .	29
1.7	Ilustrace rozložení napětí podél vývodu s výrobou a bez výroby, převzato z [15] . . . . .	30
1.8	Vývoj instalovaného výkonu nesynchronních výroben obnovitelné zdroje energie (OZE) [2, 3] . . . . .	31
1.9	Možná uspořádání výrobní jednotka (VJ) do výrobních modulů (VM) a výroben [7, 5, 8] . . . . .	33
3.1	Charakteristika snížení činného výkonu při podfrekvenci, převzato z [7] . . . . .	38
3.2	Charakteristika schopnosti překlenout poruchu pro nesynchronní výroby, převzato z [1] . . . . .	41
3.3	Charakteristika schopnosti překlenout krátkodobé nadpětí, převzato z [1] . . . . .	41
3.4	Charakteristika snížení činného výkonu při nadfrekvenci, převzato z [7] . . . . .	43
3.5	Charakteristika snížení činného výkonu při nadfrekvenci s nastavenou deaktivací hranicí, převzato z [7] . . . . .	44
3.6	Charakteristika schopnosti odezvy činného výkonu při snížení frekvence, převzato z [1] . . . . .	44
3.7	Profil $U - Q/P_{max}$ nesynchronního výrobního modulu při maximální kapacitě, převzato z [5] . . . . .	46
3.8	Profil $P - Q/P_{max}$ nesynchronního výrobního modulu při nižší než maximální kapacitě, převzato z [5] . . . . .	47
3.9	$Q(P)$ oblast při jmenovitém napětí, převzato z [7] . . . . .	48
3.10	$Q(U)$ oblast při odchylce napětí od jmenovitého v místě připojení, převzato z [7] . . . . .	48
3.11	Příklad charakteristiky pro řízení $Q$ , respektive $\cos \varphi$ , převzato z [7] . . . . .	50
3.12	Příklad charakteristiky deaktivaci $Q(U)$ funkce, převzato z [7] . . . . .	50
3.13	Příklad dynamické odezvy na skokovou změnu hodnoty $Q(U)$ funkce s tolerančním pásmem s $\tau = 3,33$ s, převzato z [7] . . . . .	51
3.14	Charakteristika funkce $P(U)$ , převzato z [1] . . . . .	53

3.15	Základní nastavení $Q(U)$ ČEZ Distribuce, převzato z [27]	55
3.16	Základní nastavení $P(U)$ ČEZ Distribuce, převzato z [27]	55
4.1	Současný stav řízení decentrálních výroben	59
4.2	Obecné znázornění infrastruktury dispečerského řízení DS	60
4.3	Koncept dispečerské parametrizace $Q(U)$	61
5.1	Elektrická část modelu výroby	62
5.2	Blok výroby v PSCADU	62
5.3	Struktura nastavení modelu výroby	66
5.4	Blokové schéma variantního modelu nesynchronní výroby	68
5.5	Modul vyhledávací tabulky	69
5.6	Příklad nastavení charakteristiky vyhledávací tabulky	70
5.7	Modul limitace nárůstu	71
5.8	Ilustrace efektu antiwindup	71
5.9	Antiwindup blok	71
5.10	Antiwindup schéma	72
5.11	Modul měření sestavený v PSCADu	73
5.12	Měření okamžitých hodnot proudů a napětí	73
5.13	Estimace frekvence při skokové změně pomocí FFT a PLL	74
5.14	Estimace frekvence při lineární změně pomocí FFT a PLL	74
5.15	Parametry PLL	75
5.16	Zapojení bloku FFT pro měření proudu	76
5.17	Parametry bloku FFT pro měření proudu	76
5.18	Zapojení bloku FFT pro měření napětí	77
5.19	Výpočet sdružených napětí	78
5.20	Výpočet průměrných, minimálních a maximálních hodnot	78
5.21	Ilustrace převodu ze složek abc do dq0	81
5.22	Výpočet $p(t)$ a $q(t)$ v modelu	82
5.23	Nastavení dolnoproustného filtru	83
5.24	Nastavení bloku dq0 transformace	83
5.25	Výpočet $\cos \varphi$	83
5.26	Moduly „Protection processor“ a „ROCOF protection“	84
5.27	Řetězec výpočtu modulu „Protection processor“	84
5.28	Nastavení bloku inicializačního signálu	85
5.29	Nastavení bloku zpoždění před připojením	85
5.30	Řetězec výpočtu modulu „ROCOF protection“	86
5.31	Chování bloku „ROCOF protection“ při nárůstu frekvence 2 Hz/s s délkou okna 0,5 s	86
5.32	Testovací výpočet pro ilustraci chování bloku ROCOF	87
5.33	Modul řízení činného výkonu	88

5.34	Řetězec výpočtu funkce $P(U)$	89
5.35	Řetězec žádané hodnoty výkonu	89
5.36	Řetězec výpočtu funkce $P(f)$	90
5.37	Řetězec výpočtu pro blok $P(f)$ power limiting	91
5.38	Regulátor činného výkonu	92
5.39	Modul řízení jalového výkonu	93
5.40	Zapojení bloku řízení jalového výkonu	94
5.41	Příklad alternativního zadání $Q(U)$	95
5.42	Modul alternativního zadání $Q(U)$	96
5.43	Modul limitace jalového výkonu	96
5.44	Zapojení bloku limitace jalového výkonu	97
5.45	Modul nastavení $Q(P)$ oblasti	98
5.46	Příklad nastavení $Q(P)$ oblasti s 3 body charakteristiky	98
5.47	Modul nastavení proudu	99
5.48	Výpočet poměrné hodnoty 3f napětí	99
5.49	Výpočet nastavených hodnot amplitudy proudu a fázového posuvu	100
5.50	Parametry PLL	101
5.51	Oscilace $P$ při nastaveném $P_{max} = 3 MW$	101
5.52	Synchronizace nastavovaného proudu s napětím v síti	101
6.1	Blokové schéma testovací VN sítě	102
6.2	Model napáječe	104
6.3	Zapojení elektrické části modelu napáječe	104
6.4	Řetězec výpočtu modelu napáječe	104
6.5	Průběh napětí při simulaci dne	105
6.6	Modul vedení	105
6.7	Parametrická tabulka modulu vedení	105
6.8	Elektrická část modulu vedení	106
6.9	Řetězec výpočtu modulu vedení	106
6.10	Zapojení transformátoru s HRT	107
6.11	Parametrizační okno HRT	108
6.12	Stavový registr modulu HRT	109
6.13	Výběr správného směru přepnutí odbočky	110
6.14	Výběr zpoždění přepínače	110
6.15	Normalizace napětí pro HRT	110
6.16	Modul přídatného měření napětí	112
6.17	Finální zpracování hodnot přídatného měření napětí	112
6.18	Modul zátěže	114
6.19	Elektrické zapojení zátěže	114
6.20	Měření napětí a frekvence modelu zátěže	115

6.21	Výpočet nastavovaného činného a jalového výkonu . . . . .	115
6.22	Výpočet fázových hodnot odporu a indukčnosti . . . . .	116
6.23	Parametrizační tabulka modulu zátěže . . . . .	116
6.24	Impuls pro změnu nastavených parametrů zátěže . . . . .	116
6.25	Profil činného výkonu zátěže při simulaci dne . . . . .	116
6.26	Profil činného výkonu FVE (p.j.) při simulaci dne . . . . .	119
6.27	Signály parametrizace $P(U)$ . . . . .	120
6.28	Nastavená $P(U)$ charakteristika modelu . . . . .	120
6.29	Signály parametrizace $Q(P)$ . . . . .	121
6.30	Nastavená $Q(P)$ charakteristika modelu . . . . .	121
6.31	Možnosti nastavení $Q(U)$ charakteristiky pro UCH . . . . .	122
7.1	Nastavení pro ukládání kanálů do souboru . . . . .	124
7.2	Příklad zadávacího souboru s parametry pro vyhledávací tabulku pro PV1 . . . . .	124
7.3	Zapojení bloku „Multiple Run“ pro automatizaci simulací . . . . .	125
7.4	Příklad volby průběhu zadávaného $\cos \varphi$ při DŘ pro FVE na poz. 1 při zatížení = 0,1 v závislosti na disponibilním výkonu . . . . .	126
7.5	Příklad volby průběhu zadávaného $\cos \varphi$ při DŘ pro FVE na poz. 2 při zatížení = 0,5 v závislosti na disponibilním výkonu . . . . .	127
7.6	Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 1 . .	128
7.7	Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 2 . .	128
7.8	Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 3 . .	129
7.9	Napěťový koeficient výroby v závislosti na pozici výroby a zatížení vývodu . . . . .	130
7.10	Úrovně $Q$ výroby v závislosti na pozici výroby a zatížení vývodu .	131
7.11	Úrovně $Q$ výroby v p.j. v závislosti na pozici výroby a zatížení vývodu . . . . .	131
7.12	Úrovně $Q$ na sek. straně transformátoru dle pozice výroby a zatížení vývodů . . . . .	132
7.13	Ztráty vývodu s výrobnou v závislosti na pozici výroby a zatížení vývodu . . . . .	134
7.14	Napětí v přípojném místě v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 1 . . . . .	135
7.15	Úrovně $Q$ výroby v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 1 . . . . .	135
7.16	Úrovně $Q$ na sek. straně transformátoru v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 1 . . . . .	136
7.17	Napětí v přípojném místě v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 3 . . . . .	137

7.18	Úrovně $Q$ výrobní v závislosti na disp. výkonu výrobní a módu řízení, výrobní v poz. 3 . . . . .	138
7.19	Úrovně $Q$ na sek. straně transformátoru v závislosti na disp. výkonu výrobní a módu řízení, výrobní v poz. 3 . . . . .	138
8.1	Výpočet nastavení kompenzačního výkonu dle DŘ . . . . .	141
8.2	Parametrizace napětí hladiny 110 kV při denní simulaci . . . . .	142
8.3	Parametrizace výkonu FVE při denní simulaci . . . . .	142
8.4	Parametrizace výkonu zátěže při denní simulaci . . . . .	142
8.5	Průběh dodávky výkonu PV1 i PV2 . . . . .	143
8.6	Napětí na primární straně transformátoru a nastavený profil napětí . . . . .	143
8.7	Odebíraný činný a jalový výkon zátěží . . . . .	144
8.8	Napětí na vývodu 1 při simulaci dne . . . . .	145
8.9	Napětí na vývodu 2 při simulaci dne . . . . .	147
8.10	Průběh nastavených odboček transformátoru a napětí na hladině 110 kV . . . . .	147
8.11	Průběh napětí v místech měření při simulaci dne s různými nastave- ními FVE; PV1 (4 MW) na poz. 1, PV2 (2 MW) na poz.6 . . . . .	148
8.12	Tok jalového výkonu přes transformátor do hladiny 22 kV a dodávka jalového výkonu vyroben . . . . .	149
8.13	Tok $Q$ přes transf. z hladiny 110 kV do hladiny 22 kV s vyznačeným profilem zátěže . . . . .	150
8.14	Dodávka $Q$ výrobní PV1 s vyznačeným profilem zátěže . . . . .	151
8.15	Dodávka $Q$ (p.j.) výrobní PV1 s vyznačeným profilem zátěže . . . . .	151
8.16	Dodávka $Q$ výrobní PV2 s vyznačeným profilem zátěže . . . . .	152
8.17	Dodávka $Q$ (p.j.) výrobní PV2 s vyznačeným profilem zátěže . . . . .	152
8.18	Dodávka $Q$ do vývodu 1 . . . . .	153
8.19	Dodávka $Q$ do vývodu 2 . . . . .	153
8.20	Ztráty činného výkonu na obou vývodech při různých nastavení řízení . . . . .	155
E.1	Model soustavy v PSCADu . . . . .	175

# Seznam tabulek

1.1	Délky kabelových a venkovních vedení pro provozovatele distribuční soustavy (PDS) v České republice (ČR) [3] . . . . .	24
1.2	Parametry vybraných holých vodičů venkovních vedení, převzato z [13] . . . . .	24
1.3	Základní parametry vybraných transformátorů VVN/VN [20, 10] . . . . .	25
1.4	Dovolené meze napětí dle [22] . . . . .	27
1.5	Žádaná hodnota napětí v DS EG.D na hladině 22 kV [24, 23] . . . . .	28
1.6	Znaménková konvence . . . . .	34
3.1	Kategorizace výrobních modulů (VM) dle výkonu, převzato z [6] . . . . .	37
3.2	Provozní frekvenční rozsah výroben v sítích nn, vn a 110 kV, převzato z [7], [5] a [1] . . . . .	38
3.3	Rozsah provozního napětí výrobní připojené do sítě vn a 110 kV, převzato z [1] . . . . .	39
3.4	Rozsahy a doporučené hodnoty charakteristiky $P(f)$ [1, 7, 5] . . . . .	43
3.5	Rozsah provozního napětí výrobní připojené do sítě vn a 110 kV [1, 7] . . . . .	54
5.1	Charakteristika signálu pro port „Settings“ modulu LUT . . . . .	70
5.2	Charakteristika výstupních portů modulu měření . . . . .	73
5.3	Charakteristika portů modulu „Protection processor“ . . . . .	84
5.4	Charakteristika portů modulu „ROCOF protection“ . . . . .	87
5.5	Charakteristika portů modulu nastavení proudu . . . . .	88
5.6	Charakteristika portů modulu $P(f)$ power limiting . . . . .	91
5.7	Charakteristika portů modulu řízení jalového výkonu . . . . .	93
5.8	Charakteristika signálu pro port „Settings“ modulu $Q(U)$ alternativního zadávání . . . . .	95
5.9	Charakteristika portů modulu limitace jalového výkonu . . . . .	96
5.10	Charakteristika portů modulu limitace jalového výkonu . . . . .	98
5.11	Charakteristika signálu pro port „Q(P) area settings“ modulu $Q(P)$ area . . . . .	99
5.12	Charakteristika portů modulu nastavení proudu . . . . .	100
6.1	Charakteristika portů modulu napáječe . . . . .	103
6.2	Charakteristika portů modulu HRT . . . . .	108
6.3	Charakteristika portů modulu přídavného měření napětí . . . . .	111
6.4	Charakteristika portů modulu zátěže . . . . .	114
7.1	Seznam scénářů pro simulace ustáleného chodu . . . . .	123
8.1	Parametry výroben pro simulaci dne . . . . .	140
8.2	Statistické hodnoty z rozložení napětí dle krabicového grafu . . . . .	146
F.1	Obsah elektronické přílohy . . . . .	176



# Seznam výpisů

A.1	Skript pro modul vyhledávací tabulky . . . . .	165
C.1	Skript pro modul $Q(P)$ oblasti . . . . .	168
D.1	Skript pro modul alternativního zadání $Q(U)$ . . . . .	173

# Úvod

Bez elektrické energie si již nelze fungování dnešní moderní společnosti představit. I krátkodobá přerušení dodávky je schopné ochromit běžné fungování společnosti. Od začátku rozvoje energetiky se vedou neustále spory o budoucím směřování vývoje celého odvětví. Vydat se cestou centralizované nebo decentralizované energetiky? Používat pro přenos energie střídavý nebo stejnosměrný proud? Tyto otázky nejsou ani v současnosti uspokojivě zodpovězeny. Alespoň u druhé otázky ale lze pozorovat určitý konsenzus pro použití určitého typu proudu. Naopak u první otázky lze stále očekávat vývoj. Na počátku využívání elektrické energie by se dala výroba popsat jako „decentralizovaná“ ve smyslu, že malé napájecí zdroje ve městech nebo továrnách poskytovaly napájení pro malé oblasti a tyto oblasti se postupně spojovaly; výpadek jedné výroby neznamenal ztrátu napájení celé propojené oblasti. V dalším vývoji se tyto výroby přesouvaly mimo města a budovaly se s většími výkony. Následný vývoj umožnil pokles ceny za dopravu paliva, za obsluhu a tedy i za vyrobenou energii. Za nevýhodu lze ale považovat nutnost nahrazení velkého výkonu při jeho výpadku. Tyto velké zdroje využívaly a stále využívají fosilní paliva, případně jadernou energii.

Výrazné změny v koncepci budoucího vývoje energetiky jsou zapříčiněny obavami z klimatických změn a z vyčerpání fosilních zdrojů. Nebyly by ale možné bez vývoje v této oblasti a dostupnosti ekonomicky výhodných malých zdrojů. Tyto nejen že mohou být napájeny z (podle lidských měřítek) nevyčerpatelných zdrojů (sluneční energie, vítr), ale mohou fungovat rovněž plně automaticky, čímž dále snižují náklady na palivo a obsluhu. Pro vyšší výkony těchto decentrálních zdrojů a hlavně pro nezávislost na počasí při podpoře soustavy je ale stále využíváno převážně fosilního paliva, které ale nevyžaduje nákladnou pozemní přepravu – zemního plynu.

Mezi nejvýznamněji se rozvíjející malé zdroje v ČR lze považovat mimo OZE plynové elektrárny a z OZE fotovoltaické elektrárny (FVE), větrné elektrárny (VTE), malé vodní elektrárny (MVE) a elektrárny spalující biomasu a bioplyn. Tento trend lze sledovat po celém světě.

Mezi lety 2009 a 2013 proběhlo v ČR masivní rozvoj OZE. Tyto zdroje byly před rokem 2009 v České republice velmi minoritně zastoupeny [2]. Ale jejich rozvoj umožnila vysoká a nepromyšlená finanční podpora ze strany ČR. V průběhu let 2014 – 2019 (po skončení finanční podpory) již nedocházelo k tak výraznému nárůstu instalovaného výkonu FVE. Nárůst instalovaného výkonu VTE je pozvolný a dal by se považovat za lineární. Podíl FVE na instalovaném výkonu byl v roce 2019 9 %, zatímco VTE 2 % a celkový podíl OZE dosáhl 13,59 %. [3] Proběhlo tedy připojení velkého instalovaného výkonu zdrojů závislých na počasí dříve než byly připraveny promyšlené připojovací podmínky a zařazení zdrojů do řízení DS a do

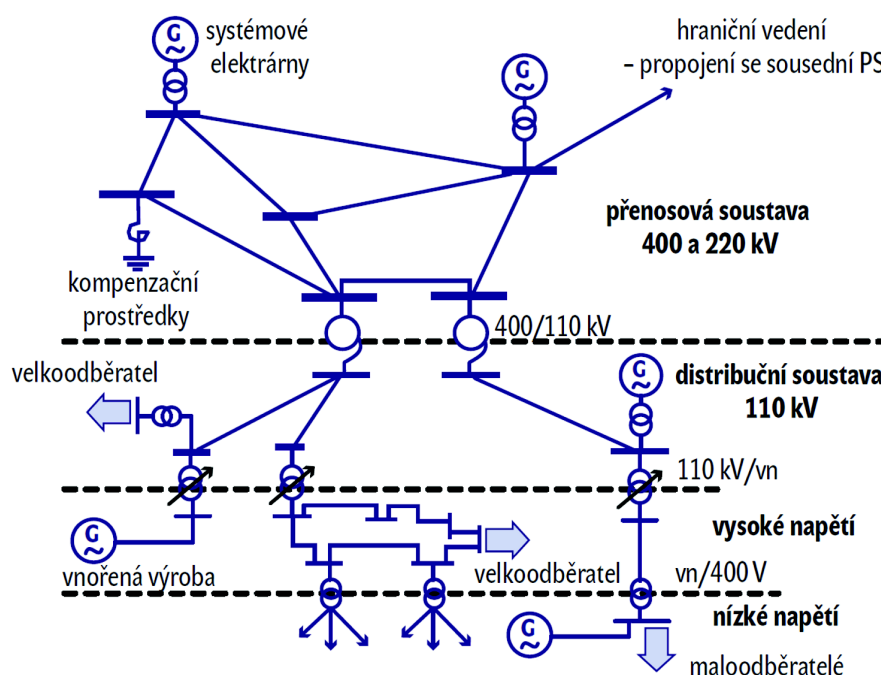
systému podpory soustavy.

Tímto se ale zvýraznily nevýhody spojené s závislostí výroby FVE a VTE na počasí a objevila se nutnost připravenosti elektrizační soustavy (ES) na rychlou reakci na nápravu kvalitativních parametrů elektrické energie v závislosti na změnu výroby z těchto zdrojů. Zajímavou možností představují střídačové zdroje, které mají velký rozsah jalového výkonu (dodávky i odběru) a oproti točivým strojům velmi malou setrvačnost, díky čemuž umožňují reagovat jak na stavy v přípojném místě, tak i na dispečerský pokyn pro změnu výroby jalového výkonu prakticky v reálném čase.

Podpora sítě výrobny jejich vlastní autonomní odezvou na změnu frekvence a napětí v příslušném přípojném místě jsou důležitým předpokladem pro dobrou stabilitu sítě a omezení neplánovaných výpadků omezující jak koncové odběratele, tak dodavatele elektrické energie, protože autonomní řízení výroby dokáže reagovat na aktuální stav v přípojném místě rychleji než dispečerský řídicí systém (DŘS). Infrastruktura dispečerského řízení umožňuje řízení parametrů sítě dle momentálních požadavků PDS a stavu soustavy s ohledem na analýzu provozu v celé soustavě, zatímco kvalitní autonomní řízení umožňuje snížit zátěž centrálního DŘS při udržení vysoké míry kvality energie a spolehlivosti dodávky. Pro správnou funkčnost je důležité, aby byla zajištěna kompatibilita obou způsobů řízení.

# 1 Stávající situace distribuční soustavy na hladině vysokého napětí

DS tvoří mezičlánek mezi energií přenášenou přenosovou soustavou (PS), případně dodanou výrobkami elektrické energie přímo do DS a jednotlivými odběrateli. Příklad uspořádání elektrizační soustavy je na obr. 1.1. [10]



Obr. 1.1: Uspořádání elektrizační soustavy, převzato z [10]

DS tvoří venkovní a kabelová vedení a další zařízení na napěťových hladinách 110 kV (mimo vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy), 35 kV, 22 kV, 10 kV, 6 kV a 0,4 kV. Nejčastěji jsou sítě VN tvořeny jako paprskové nebo průběžné s neúčinně uzemněným uzlem (obvykle kompenzovaným) transformátorem. [10]

## 1.1 Vedení vysokého napětí

Dominantní variantou typu vedení používaného na úrovni VN v ČR je i přes narůstající podíl kabelových vedení stále venkovní vedení. Podíl kabelových a venkovních vedení je pro jednotlivé PDS v tabulce 1.1. Jediným distributorem s převažujícím podílem kabelových vedení je PREdistribuce z důvodu specifičnosti svého distribučního území.

Tab. 1.1: Délky kabelových a venkovních vedení pro PDS v ČR [3]

PDS	Venkovní vedení (km)	Kabelové vedení (km)
ČEZ Distribuce	40 166	10 839
EG.D	18 475	3 867
PREdistribuce	108	3 806

Kabelová vedení jsou v důsledku svých vyšších pořizovacích nákladů vhodná zejména do míst, kde nelze z určitých prostorových, bezpečnostních nebo jiných důvodů použít venkovní vedení – na hladině VN jsou tedy nejvíce zastoupeny na území měst. Pro venkovní vedení se v ČR využívají nejčastěji holé vodiče AlFe těchto typů: AlFe 42/7, AlFe 70/11-1 a AlFe 110/22. V oblastech lesních úseků nebo v místech, kde je požadavek na zúžení ochranného pásma se využívají také jednoduché izolované vodiče (pouze se základní izolací) [10]. Jejich parametry jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Délky vedení VN jsou rozsahem kratší než vedení 110 kV, které mohou dosahovat délek až několika desítek kilometrů. [10] Z veřejně dostupných informací není možné dostatečně zjistit rozlohu průměrného vývodu na hladině VN. Bude proveden kvalifikovaný odhad dle úbytku napětí na vedení při simulaci.

Tab. 1.2: Parametry vybraných holých vodičů venkovních vedení, převzato z [13]

Označení	$R_k$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$X_k$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$B_k$ ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
AlFe 42/7	0,839	0,360	3,171
AlFe 70/11-1	0,501	0,345	3,324
AlFe 110/22	0,300	0,330	3,477

## 1.2 Napáječ z hladiny 110 kV

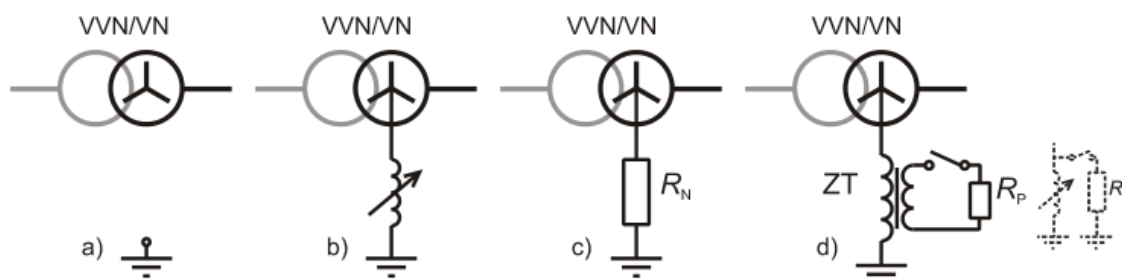
Pro potřeby modelování nadřazené soustavy na hladině 110 kV je nutné znát její zkratový výkon a napětí udržované na hladině nadřazené soustavy. Z dostupných zdrojů [18, 17, 16, 19] je možné považovat za běžný zkratový výkon hodnoty mezi 800 MVA a 4500 MVA. Jako volba pro modelování tvrdé sítě je zvolena hodnota zkratového výkonu 3500 MVA.

### 1.2.1 Transformátor 110/22 kV

Dle [10] jsou v české distribuční soustavě používané transformátory VVN/VN výkonů 40 MVA, 25 MVA a 16 MVA s regulací pomocí přepínání odboček pod zátěží v rozsahu  $\pm 8 \times 2\%$  na straně vyššího napětí. Parametry transformátorů jsou v tabulce 1.3. Dle zdroje [20] jsou jako možnost uvedené rovněž transformátory o jmenovitém výkonu 50 MVA a 63 MVA, zatímco jako možnost není uveden transformátor o výkonu 16 MVA.

Uzel transformátoru je provozován na hladině VN dle požadavků jak je uvedeno v [10] jako:

- izolovaný – obr. 1.2 a),
- uzemněný přes zhášecí tlumivku – obr. 1.2 b),
- uzemněný přes uzlový odporník – obr. 1.2 c),
- uzemněný přes zhášecí tlumivku s automatikou přepínání pomocného odporníku – obr. 1.2 d).



Obr. 1.2: Příklady systému uzemnění uzlu transformátoru v DS na hladině VN, převzato z [10]

Tab. 1.3: Základní parametry vybraných transformátorů VVN/VN [20, 10]

$S_n$ (MVA)	převod	odbočky	$u_k$ (%)	$i_0$ (%)	$\Delta P_k$ (kW)	$\Delta P_0$ (kW)
25	110/23/6,3	$\pm 8 \times 2\%$	11	2	90	20
40	110/23/6,3	$\pm 8 \times 2\%$	11	1,8	120	20

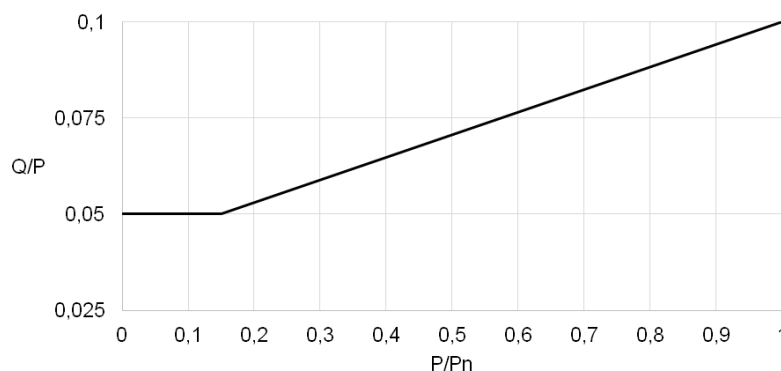
## 1.3 Zatěžování sítě VN

Pro realistickou simulaci sítě VN je nutné znát běžné zatížení transformátorů a vodiů. V analýze v závěrečné práci [21] bylo určeno, že většina distribučních transformátorů je zatížena do 60 %  $S_n$ . Toto koreluje se zjištěním ve studii [8]. Nebylo možné

z dostupných informací určit standardní zatížení i transformátorů VVN/VN, toto bude tedy určeno odhadem na základě dostupných informací v uvedených zdrojích.

Maximální uvažované zatížení distribučního transformátoru zdánlivým výkonem bude zvoleno  $0,6S_n$ .

V rámci studie [8] byla rovněž provedena analýza zatížení trafostanic činným a zdánlivým výkonem, z kterého byla vyvozena výkonová křivka. Většina zátěží byla induktivního charakteru, v simulaci tedy jsou uvažovány pouze induktivní zátěže s poměrem jalového a činného výkonu dle výkonové čáry na obr. 1.3. Lze z ní rovněž určit, že se vzrůstající zátěží mají tato zatížení náchylnost k vyššímu účinníku. Zatímco při  $P/P_n = 0,15$  je  $\cos \varphi = 0,949$ , při  $P/P_n = 1$  je  $\cos \varphi = 0,995$ .



Obr. 1.3: Výkonová křivka pro určení odebíraného jalového výkonu zátěže, převzato z [8]

## 1.4 Koncepce koordinace napětí

Základním cílem regulace napětí v distribuční soustavě je dodržení limitů stanovených v [22], při jejichž stanovení bylo přihlíženo na požadavky odběratelů i na možnosti regulace napětí. Je důležité napětí v těchto mezích udržet, aby byl zajištěn optimální a bezpečný chod spotřebičů.

Povolené odchylky pro hladinu 22 kV i pro hladinu 110 kV jsou  $\pm 10\%$ , což znamená, že v libovolném týdenním období 95 % efektivních hodnot napětí měřených v 10minutových intervalech musí být v mezích dle tabulky 1.4.

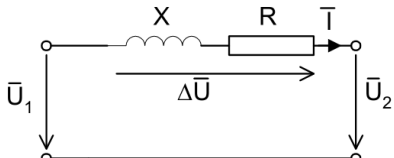
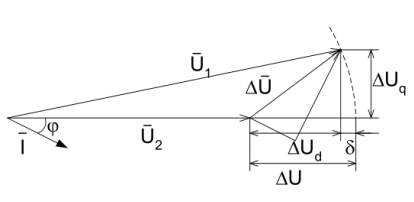
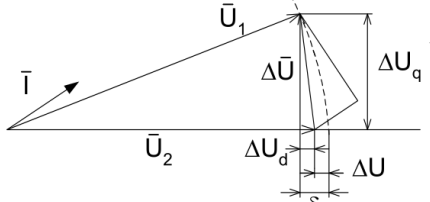
Při regulaci napětí lze uvažovat při jednosměrném toku výkonu (bez distribuované výroby) o prosté eliminaci úbytku napětí. Úbytek napětí lze definovat jako rozdíl napětí mezi 2 místy v síti (obvykle mezi napáječem a odběrným místem) – a to rozdíl jejich absolutních efektivních hodnot dle rovnice (1.1) [10].

$$\Delta U = |U_1| - |U_2| \quad [V; V, V] \quad (1.1)$$

Tab. 1.4: Dovolené meze napětí dle [22]

$U_c$ (kV)	horní mez (kV)	spodní mez (kV)
22	24,2	19,8
110	121	99

V případě, že budou zanedbány příčné admittance, což je možné na vedeních VN a nízkého napětí (NN) a na transformátorech, je výsledkem náhradní schéma na obr. 1.4. Při tomto předpokladu je možné určit fázorový diagram pro induktivní a kapacitní zátěž. Z fázorových diagramů je následně možné odvodit rovnice pro induktivní a kapacitní úbytky napětí ve směru os d a q –  $\Delta U_d$  a  $\Delta U_q$ . [10]

náhradní schéma		
fázorový diagram		
$\Delta U_d$	$R.I.\cos\varphi + X.I\sin\varphi$	$R.I.\cos\varphi - X.I\sin\varphi$
$\Delta U_q$	$X.I\cos\varphi - R.I.\sin\varphi$	$X.I\cos\varphi + R.I.\sin\varphi$
$\delta = \frac{1}{2}\Delta U_q^2$	$\frac{1}{2}(X.I\cos\varphi - R.I.\sin\varphi)^2$	$\frac{1}{2}(X.I\cos\varphi + R.I.\sin\varphi)^2$
$\Delta U$	$\Delta U_d + \delta = \Delta U_d + \frac{1}{2}\Delta U_q^2$	

Obr. 1.4: Výpočet úbytku napětí při zanedbání příčných prvků, převzato z [10]

Při výpočtu úbytku napětí vedení, kde  $X \cong R$  a kde  $\cos\phi$  je vysoký (dle kap. 1.3), lze zanedbat hodnotu  $\delta$ . V důsledku lze uvažovat pro úbytky na vedení s rovnicemi (1.2a) pro induktivní a (1.2b) pro kapacitní zátěž.



$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi + X \cdot I \cdot \sin \varphi = R \cdot I_{\epsilon} + X \cdot I_j \quad [V; \Omega, A, -, \Omega, A, -; \Omega, A, \Omega, A] \quad (1.2a)$$

$$\Delta U = R \cdot I \cdot \cos \varphi - X \cdot I \cdot \sin \varphi = R \cdot I_{\epsilon} - X \cdot I_j \quad [V; \Omega, A, -, \Omega, A, -; \Omega, A, \Omega, A] \quad (1.2b)$$

Z výše uvedených rovnic (1.2a) a (1.2b) vyplývá několik možností redukce úbytku napětí a k dodržení napětí v limitech stanovených v [22]:

1. změna parametrů vedení –  $R$  a  $X$ :
  - rekonstrukce vedení (zvětšení průřezu),
  - zdvojení vedení,
  - sériová kompenzace podélných prvků vedení,
  - výměna transformátorů s vysokým  $u_k$ ;
2. změna přenášeného  $P$  (a tím proudu  $I_{\epsilon}$ ),
3. změna přenášeného  $Q$  (a tím proudu  $I_j$ ):
  - kompenzace jalového výkonu,
  - povinnost odběratelů udržovat smlouvenou hodnotu účinníku;
4. úprava napětí na VN straně transformátoru:
  - transformátory s OLTC;
5. zvýšení počtu napájecích stanic.

Změny uvedené v bodě 1 se standardně provádějí, ale jsou tou nejnákladnější možností regulace úbytku napětí. Redukci přenášeného  $P$  lze považovat za nežádoucí, protože distribuce  $P$  je primárním účelem DS. Změna přenášeného jalového výkonu distribuovanou kompenzací účinníku v síti je rovněž prováděna a PDS má možnost velkoodběrateli nařídit udržování stanoveného účinníku; u maloodběratele (domácnosti) tato povinnost není v současnosti vymahatelná.

Možnosti v bodech 1, 2, 3 ale obvykle nemají možnost změnit napravované parametry při provozu soustavy. Možnosti zásahu do napěťových poměrů v reálném čase při provozu soustavy jsou popsány v kapitolách níže.

V důsledku úbytku napětí na vývodu je proto jako žádaná hodnota na straně nižšího napětí transformátoru volena hodnota vyšší, než je dohodnuté napětí. Např. v distribuční soustavě EG.D jsou žádané hodnoty napětí uvedeny v tabulce 1.5.

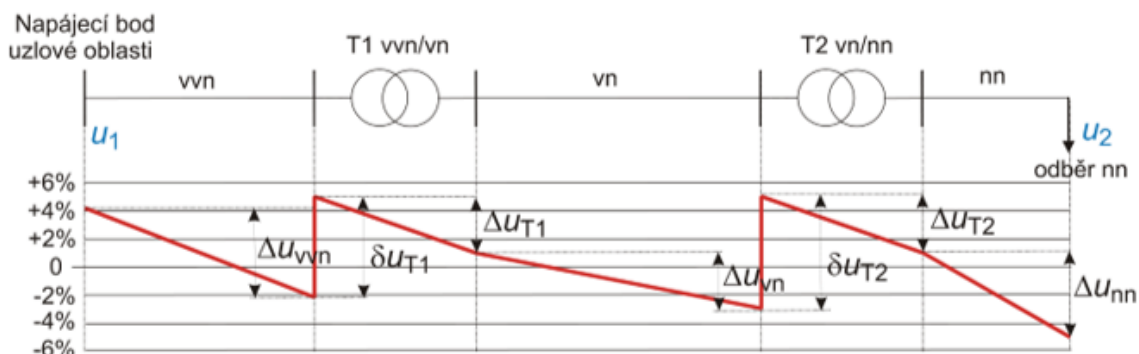
Tab. 1.5: Žádaná hodnota napětí v DS EG.D na hladině 22 kV [24, 23]

Oblast	napětí (kV)
východ	22,8
západ	23,1

### 1.4.1 Transformátor s přepínáním odboček pod zátěží

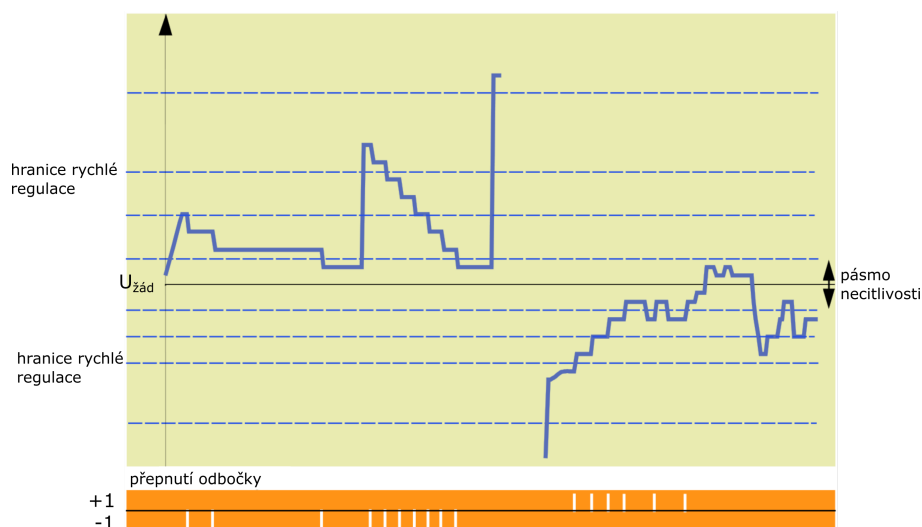
Nejčastěji používaným způsobem pro udržení napětí na hladině VN v daných mezích je využití transformátorů s OLTC. OLTC znamená, že transformátor je schopen měnit svůj převod při zatížení. Obvyklý počet odboček transformátorů VVN/VN je  $\pm 8 \times 2\%$ . Přepínač odboček bývá umístěn na straně vyššího napětí. [10]

Teoretický průběh odchylek napětí od dohodnutého (na hladině VVN a VN) a od jmenovitého (na hladině NN) je na obr. 1.5.



Obr. 1.5: Regulace napětí při použití transformátoru s OLTC, převzato z [10]

Pro simulaci hladinového regulátoru transformátoru (HRT) byl vybrán HRT od společnosti Eberle, z dostupných manuálů k přepínačům odboček má tato společnost nejlépe zpracované materiály a bylo možné vytvořit model odpovídající reálnému přepínači. Odezva regulátoru na odchylku o dohodnutého napětí na straně nižšího napětí transformátoru je vyobrazena na obr. 1.6.

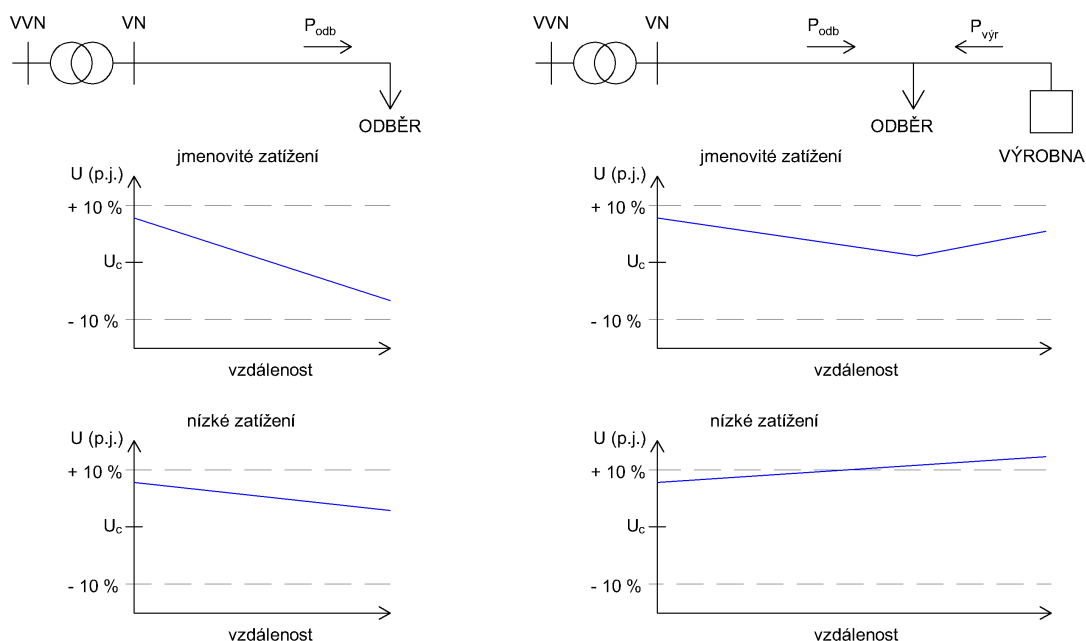


Obr. 1.6: Ilustrace přepínání odbočky, převzato z [28]

Konkrétní nastavení je popsáno v kapitole ... (Popis modelu transformátoru a HRTu pro simulaci)

### 1.4.2 Zvýšení počtu napájecích stanic

Zvýšení počtu napájecích stanic odpovídá buď hustšímu zasítování napájecí oblasti (mřížová, zauzlovaná nebo okružní síť) nebo zvýšené hustotě decentrální výroby v napájecí oblasti. Zatímco při vyšším zasítování se nemění směr toku výkonu a tedy i směr úbytku napětí, při dodávce energie přímo do distribuční soustavy na hladině VN lze v některých případech očekávat obrácený směr úbytku napětí – tedy ne směrem k odběratelům, ale směrem k transformátoru VVN/VN. Tento tok činného výkonu může způsobit překročení dovolených limitů napětí jak je vyobrazeno na obr. 1.7. Na obrázku je rovněž vyznačeno jak se může měnit napěťový profil vývodů při změně zatížení nebo výroby.



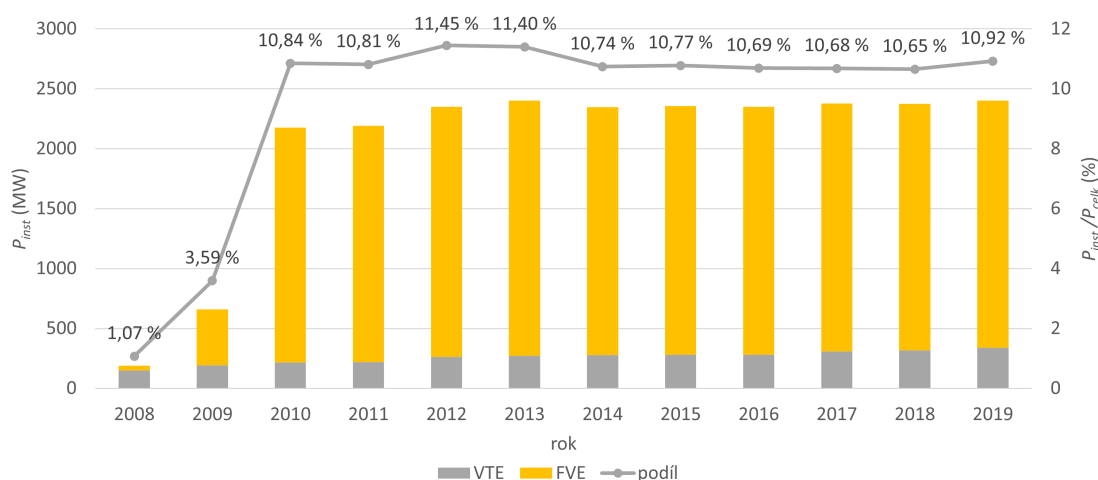
Obr. 1.7: Ilustrace rozložení napětí podél vývodu s výrobou a bez výroby, převzato z [15]

Není možné toto zvýšení napětí omezovat primárně snížením přenášeného výkonu, což tedy PDS vede k rekonstrukcím vedení. Nabízí se ale další možnost pro regulaci napětí v místě připojení výroby – autonomní řízení výroben popsané v kapitole ... Funkce  $P(U)$  a  $Q(U)$  jsou schopné regulace napětí formou dodávky nebo odběru jalového výkonu, případně v krajním případě i snížením dodávaného činného výkonu.

V případě, že je nutné napravit napěťové poměry nebo tok jalového výkonu ve větší oblasti, lze využít i dálkového – dispečerského – zadávání vyráběného jalového výkonu, či udržovaného napětí. Současný stav popsán v kapitole 4.

## 1.5 Současný stav připojených výroben

Jak je již uvedeno v úvodu, k největším nárůstům instalovaného výkonu OZE, převážně FVE došlo v reakci na výraznou finanční podporu ze strany ČR mezi roky 2009 a 2013. V průběhu let 2014 – 2019 (po skončení finanční podpory) již nedocházelo k výraznému nárůstu instalovaného výkonu FVE. Nárůst instalovaného výkonu VTE je pozvolný a dal by se považovat za lineární růst. Podíl FVE na instalovaném výkonu byl v roce 2019 9 %, zatímco VTE 2 % a celkový podíl OZE včetně MVE dosáhl 13,59 %. [3] Tento vývoj je na obr. 1.8. Celkový instalovaný výkon zdrojů připojených do hladiny VN byl dle [25] v roce 2019 3786 MW (zahrnuje všechny zdroje) a je předpokládán jejich nárůst. Zatímco pro konvenční zdroje je předpokládán jejich postupný útlum, pro zdroje OZE je v závislosti na budoucí nastavenou politiku podpory předpokládán růst, a tedy v podmínkách ČR nárůst hlavně nesynchronních výroben připojených do DS. Podrobnosti současné koncepce dispečerského řízení (DŘ) jsou uvedeny v kapitole 4.



Obr. 1.8: Vývoj instalovaného výkonu nesynchronních výroben OZE [2, 3]

### 1.5.1 Uspořádání výroben

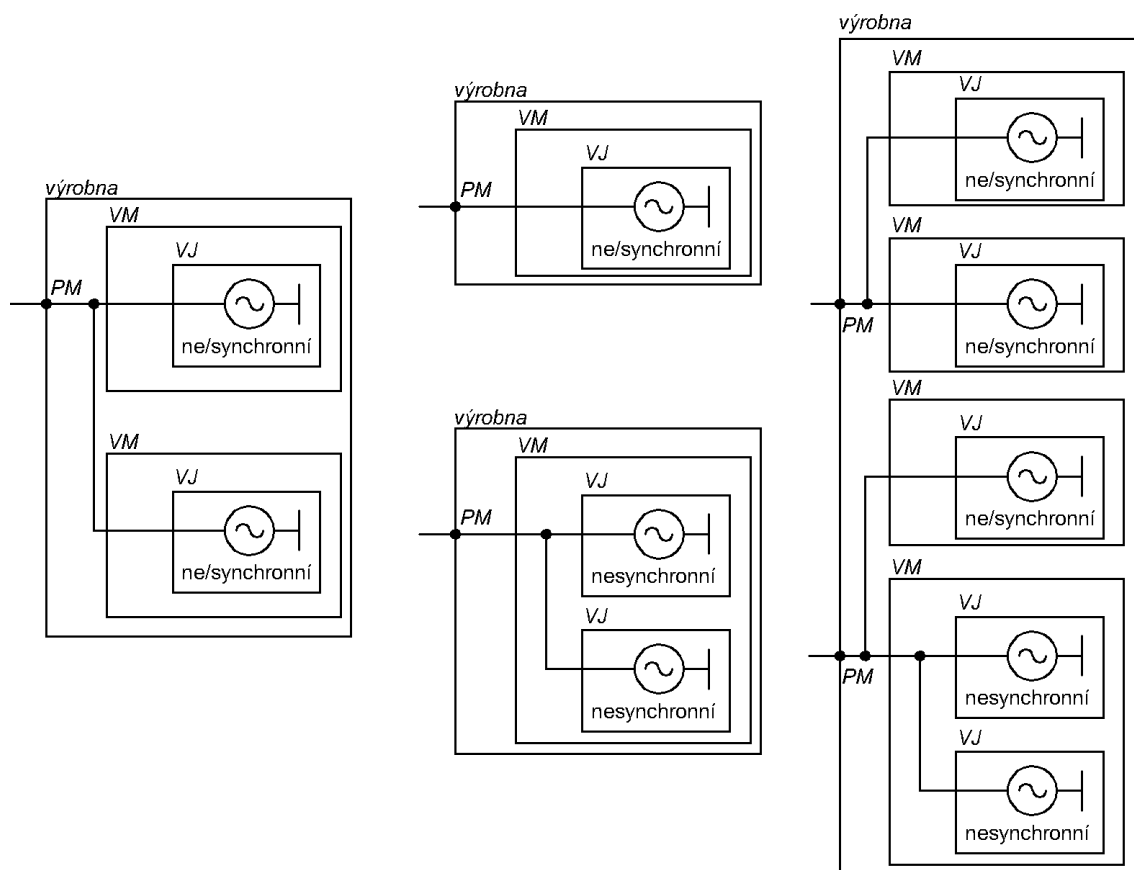
Výrobní elektřiny (dále jen výrobní) je z pohledu [5] (Requirement for generation (RfG)) „zařízení, které převádí primární energii na energii elektrickou a sestává z jednoho nebo více VM připojených k soustavě v jednom nebo více místech připojení

(PM)“. Dle [7](EN 50549-2) je definována výrobná (generating plant) definována jako soubor výrobních modulů připojených do jednoho přípojného místa, včetně všeho příslušenství a zařízení pro připojení k přípojnému místu; k definici je připojena poznámka, že pro legislativní dokumenty se může definice výrobní lišit. Oba dokumenty se v tomto případě shodují, že výrobnou je celek se všemi výrobními moduly umístěný v jednom fyzickém místě.

V definici VM se [5] ani [7] příliš neliší. Oba dokumenty rozlišují definici synchronního a nesynchronního výrobního modulu. V případě synchronního modulu se jedná o „nedělitelný soubor zařízení, který je schopen vyrábět elektrickou energii tak, že frekvence vyrobeného napětí, rychlost generátoru a frekvence napětí v síti jsou ve stálém poměru, a tedy v synchronismu“. Nesynchronní modul je definován jako „blok nebo soubor bloků vyrábějící elektřinu, který je nesynchronně připojen k soustavě nebo je připojen prostřednictvím výkonové elektroniky a který je k přenosové soustavě, k distribuční soustavě včetně uzavřené distribuční soustavy nebo k vysokonapěťové stejnosměrné soustavě připojen v jediném místě připojení“. VM je tedy dle definic v těchto dokumentech soubor všech zařízení jednotlivých schopných samostatné dodávky do ES, např. elektrárenský blok.

[7] definuje další pojem – VJ, což je nejmenší nedělitelný soubor zařízení schopných samostatné výroby elektrické energie (např. paroplynová výroba složená z plynové turbíny a parní turbíny a příslušných alternátorů), ale tato zařízení musí podléhat shodným požadavkům.

Příklady možného uspořádání VJ do VM a vyroben je na obr. 1.9.



Obr. 1.9: Možná uspořádání VJ do VM a výroben [7, 5, 8]

## 1.6 Výkonová znaménková konvence

Důležitým prvkem pro orientaci v tocích výkonu v simulaci je nutnost zavést jednotnou tzv. znaménkovou konvenci.

Pro výrobní a nadřazenou soustavu je použita „zdrojová“ znaménková konvence, což znamená že dodávka činného výkonu je kladná, vyráběný jalový výkon induktivního charakteru kladný a vyráběný jalový výkon kapacitního charakteru záporný.

Pro odběry je použita „spotřebičová“ znaménková konvence, což znamená že odběr činného výkonu je kladný, odběr jalového výkonu induktivního charakteru kladný a odběr jalového výkonu kapacitního charakteru záporný.

Rovněž pro zjednodušení práce se zpracovávanými daty bude využito znaménkové konvence rovněž při určování  $\cos \varphi$ . Tzn. že v případě, že bude udán účinník výrobní -0,95, bude to znamenat odběr jalového výkonu s účinníkem 0,95.

V případě, že nebude uveden charakter jalového výkonu, jedná se o jalový výkon induktivní. Toto je shrnuto v tabulce 1.6.

Tab. 1.6: Znaménková konvence

výkon		zdrojová		spotřebičová	
		dodávka	odběr	dodávka	odběr
činný		+	-	-	+
jalový	induktivní	+	-	-	+
	kapacitní	-	+	+	-

## 2 Cíle práce

Dílčím cílem diplomové práce je řešerše stávajících požadavků na zdroje připojované do DS se zaměřením na požadavky aplikovatelné na decentrální zdroje (především FVE) ve smyslu normy EN 50549-2 – [7], směrnice Evropské komise RfG v adaptaci pro ČR – [5].

Hlavním cílem je zhodnocení koexistence možností kombinace autonomního řízení decentrálních zdrojů s implementovanou vrstvou dispečerského řízení.

Pro zhodnocení je nutné provést parametrické simulace, pro něž jsou vytvořeny potřebné dynamické modely simulující dostatečně chování reálných prvků elektrizační soustavy. Modely jsou schopny aktivního řízení svého chování v síti při běhu simulace. Tvorba zmíněných modelů a simulace v časové oblasti proběhne v programu PSCAD.

Protože aktuálně požadované a implementované způsoby řízení v české distribuční soustavě s kombinací autonomního a dispečerského řízení nepočítají s možnostmi dispečerského řízení zdrojů vůbec nebo jen v omezené míře, je nutné ověřit a zhodnotit způsoby nastavení těchto řídicích funkcí.

Ověření vhodného nastavení funkce autonomního řízení je provedeno simulováním variant ustáleného chodu sítě s pouze jednou aktivní výrobnou s různými parametry řízení simulované výroby, její různou elektrickou vzdáleností od transformátoru s vyšší napětovou hladinou a s různým zatížením sítě. Zvoleno je následně nastavení nejvíce vhodné dle definovaných ukazatelů.

Pro ověření možnosti koexistence a zároveň kompatibility při existenci více zdrojů v jedné oblasti distribuční soustavy bude použito simulace relevantní části dne s parametry sítě založenými na reálném pozorování chování a trendů v soustavě s přídatným prvkem náhodnosti.

Vzhledem k již současnému výraznému podílu FVE na instalovaném výkonu OZE a k očekávanému nárůstu dle kap. 1.5 bude model decentrálního zdroje představovat model FVE.



### **3 Autonomní řízení zdrojů s připojením do VN v souladu s požadavky na výrobní moduly/zařízení dle EN 50549-2 a směrnice RfG**

Řídící charakteristiky autonomního řízení připojovaných výroben do distribuční soustavy na území České republiky specifikuje několik dokumentů. Hlavním dokumentem je nařízení komise (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, označovaného jako RfG, která zavádí kodex sítě, jenž stanoví požadavky na připojení výroben elektřiny (synchronních i nesynchronních výrobních modulů) k propojené elektrizační soustavě. Uvádí požadavky pro výrobní typů uvedených v kapitole 3.1. [5]

Neméně důležitým dokumentem je norma EN 50549-2 z roku 2019, která specifikuje požadavky na paralelně připojené výrobní do typu B (v případě národní definice i do podkategorií typu B) připojené do sítě VN a je možné ji použít k prokázání shody s RfG. Norma se zabývá specifikací podmínek provozu výrobní při normálních provozních podmínkách, při poruše v soustavě, rovněž definuje odezvu výrobní na napětovou a frekvenční odchylku, kvalitu dodávaného výkonu, nastavení ochrany apod. [7]

Oba výše zmíněné dokumenty umožňují provozovatelům příslušných distribučních soustav určitou volnost při určování parametrů řídicích charakteristik, proto je pro Českou republiku vydán dokument shrnující a rozšiřující požadavky výše uvedených dokumentů a případně konkretizující jednotlivé požadované hodnoty: Pravidla provozování distribučních soustav – příloha 4. [1]

#### **3.1 Kategorie výrobních modulů dle RfG**

Energetický regulační úřad (ERÚ) upřesňuje kategorie výrobních modulů z RfG a jejich požadavky v [6]. Tato práce se zabývá problematikou řízení nesynchronních výroben, na které se vztahuje EN 50549-2, proto budou v následujících částech zohledněny požadavky na výrobní pouze do podkategorie B2.

Tab. 3.1: Kategorizace VM dle výkonu, převzato z [6]

Typ výr. modulu	Limit	Podkat.	Hranice PDS	Nejvýznamější požadavky RfG
A	800 W	A1	$\geq 800 \text{ W}$ $\leq 11 \text{ kW}$	podle čl. 13 pro VM typu A
		A2	$> 11 \text{ kW}$ $\leq 100 \text{ kW}$	podle čl. 13 pro VM typu A a podle čl. 14.2, 14.3. 14.4., 14.5 a podle čl 20. pro nesynchronní VM
B	1 MW	B1	$> 100 \text{ kW}$ $\leq 1 \text{ MW}$	podle čl. 14, podle čl. 17 pro synchronní a podle čl. 20 pro nesynchronní VM
		B2	$> 1 \text{ MW}$ $\leq 30 \text{ MW}$	podle čl. 14 pro VM typu B, podle čl. 17 pro synchronní VM, podle čl. 15.2, 15.3. 15.4, 15.5a, 15.5b, 15.5c, 15.6a, 15.6b, 15.6c, podle čl. 18 pro synchronní VM a podle čl. 21 pro nesynchronní VM
C	50 MW	C	$\geq 30 \text{ MW}$	podle čl. 15, čl. 18 a čl. 21
D	75 MW	D	$\geq 75 \text{ MW}$	podle čl. 16, čl. 19 a čl. 22

## 3.2 Provoz při normálních provozních podmínkách

Výrobný musí být schopný provozu při níže uvedených podmínkách bez ohledu na topologii a nastavení ochran.

### 3.2.1 Provozní rozsah frekvence

[5], [7] i [1] uvádí rozsahy frekvencí a příslušné minimální doby trvání, po které se výrobná nesmí odpojit od sítě v případě, že se frekvence soustavy nachází v příslušném rozsahu. RfG a EN 50549-2 uvádí volnost při přizpůsobení dob trvání, tyto jsou v Pravidel pro provozování distribuční soustavy (PPDS) uvedeny. Všechny dokumenty uvádí nutnost výrobný zůstat připojená k soustavě v rozsahu frekvencí 49,0 – 51,0 Hz po neomezenou dobu. Nejvyšší a nejnižší rozsah frekvence není v některých dokumentech uveden s požadavkem minimální doby trvání. Výrobná se může sama odpojit od soustavy pouze v případě že vybaví ochrana působící z důvodu rychlosti změny frekvence. (viz kapitola 3.3.1)

Tab. 3.2: Provozní frekvenční rozsah výroben v sítích nn, vn a 110 kV, převzato z [7], [5] a [1]

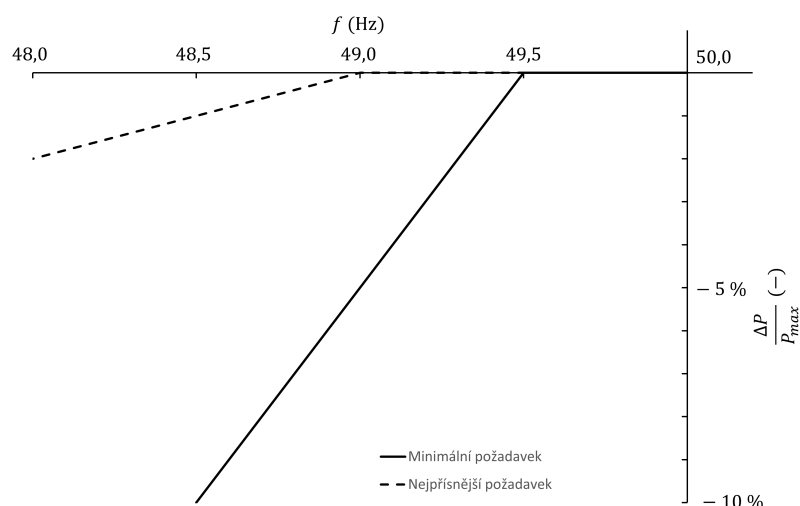
Rozsah frekvence	Doba trvání			
	Min. požadavek dle EN 50549-2	Přísný požadavek dle EN 50549-2	Požadavek dle PPDS	Požadavek dle RfG
47 – 47,5 Hz	–	20 s	20 s	–
47,5 – 48,5 Hz	30 min	30 min	30 min	min. 30 min
48,5 – 49 Hz	30 min	90 min	90 min	min. jako pro rozsah 47,5 – 48,5 Hz
49 – 51 Hz	neomezeně	neomezeně	neomezeně	neomezeně
51 – 51,5 Hz	90 min	30 min	30 min	30 min
51,5 – 52 Hz	–	15 min	–	–

### 3.2.2 Požadavky výroby činného výkonu při poklesu frekvence

Výrobní modul by měl být co nejodolnější snižování frekvence v místě připojení tak, aby byl pokles dodávaného činného výkonu minimální. [7]

Je přípustné snižování činného výkonu tak, aby se charakteristika nacházela v mezích mezi minimálním a nejprísnějším požadavkem zobrazených na obr. 3.1 [7, 5], kde:

1. nejprísnější požadavek – výrobní snižuje dodávaný činný výkon o 2 % maximální kapacity (při 50 Hz) na pokles frekvence o 1 Hz pod 49 Hz,
2. minimální požadavek – výrobní snižuje dodávaný činný výkon o 10 % maximální kapacity (při 50 Hz) na pokles frekvence o 1 Hz pod 49,5 Hz.



Obr. 3.1: Charakteristika snížení činného výkonu při podfrekvenci, převzato z [7]

$P_{max}$  je maximální trvalý činný výkon stanovený ve smlouvě o připojení nebo sta-

novený dohodou mezi provozovatelem soustavy a vlastníkem výroby, který výrobní modul může vyrobit po odečtení výkonu potřebného pro vlastní spotřebu.

### 3.2.3 Provozní rozsah napětí

Norma EN 50549-2 požaduje, aby byla výroba schopna kontinuální výroby v rozsahu napětí od 90 % do 110 %  $U_n$ . V případě, že je napětí v místě připojení mimo tento limit, má se výroba řídit dle charakteristik stanovených v kapitolách 3.3.2 a 3.3.3. [7]

V případě poklesu napětí pod 95 %  $U_n$  je možné snížit dodávku zdánlivého výkonu tak, aby nebyl překročen proudový limit výroby, ale toto snížení musí být co nejmenší. Pro tento požadavek jsou vyhodnocovány všechna sdružená napětí a pokud jsou k dispozici, tak i fázová. [7]

Norma EN 50160 umožňuje, aby v sítích VN napětí krátkodobě pokleslo až na hodnotu 85 %  $U_c$ . Je tedy nutné vzít v potaz i schopnost výroby dodávat výkon do sítě i při tomto poklesu napětí, tento požadavek je zohledněn v kapitole 3.3.2. [7]

RfG nedefinuje požadavky provozního rozsahu napětí pro VM typů A a B.

PPDS uvádí, že výroby do 800 W a výroby s VM A1 a A2 připojené do sítě NN musí být schopné provozu, pokud napětí v místě připojení je v rozsahu od 85 % do 110 %  $U_n$  a v případě poklesu napětí je dovoleno snížení dodávaného výkonu odpovídající relativní změně napětí  $(U_n - U)/U_n$ , kde  $U$  je napětí v místě připojení. [1]

Dále je v PPDS uveden rozsah trvalého provozního napětí pro výroby připojené do sítě VN a 110 kV. [1] Tyto rozsahy jsou uvedeny v tabulce 3.3.

Tab. 3.3: Rozsah provozního napětí výroby připojené do sítě vn a 110 kV, převzato z [1]

Rozsah napětí (p.j.)	Doba provozu
0,85 – 0,90	60 min
0,90 – 1,118	neomezená
1,118 – 1,15	60 min

## 3.3 Odolnost proti poruchám

Výroba by měla obecně přispívat k celkové stabilitě soustavy i poskytováním imunity proti rychlým změnám napětí, pokud není nutné výrobu bezprostředně odpojit z důvodu možného porušení bezpečnosti provozu. Následující podmínky musí být dodrženy bez ohledu na nastavení ochran.

### 3.3.1 Odolnost proti rychlosti změny frekvence (ROCOF)

Výrobna musí zůstat připojená k soustavě a dodávat výkon i při rychlostech změny frekvence do předepsané hodnoty. [7, 5, 1] Rychlost změny frekvence ROCOF je definovaná jako plovoucí průměr s délkou měřicího okna 500 ms. [7]

Hodnota ROCOF je stanovena pro nesynchronní výroby jako  $\pm 2\text{Hz}$ . [7, 1]

Odolnosti proti ROCOF není povinná pro výroby do 800 W. [1]

### 3.3.2 Překlenutí poruchy při krátkodobém poklesu napětí (UVRT)

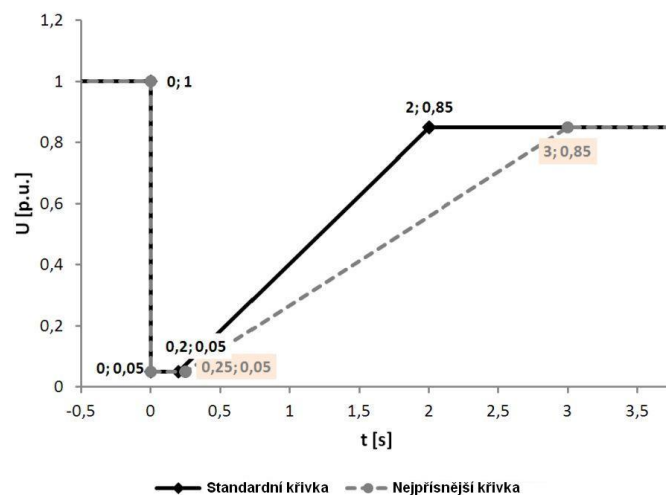
Dle RfG a normy EN 50549-2 jsou povinné poskytovat tuto podporu pouze moduly typu B a vyšší. [7, 5] PPDS ale zavádí povinnost, aby všechny připojené výroby byly schopné překlenout poruchu bez odpojení od soustavy. [1]

Tato schopnost se týká všech druhů zkratů. Pro vyhodnocení poruchy se hodnotí v sítích NN nejmenší fázové napětí (pokud je dostupné), jinak nejmenší sdružené napětí. A v sítích VN a 110 kV se hodnotí nejmenší sdružené napětí. [7, 1]

Pro splnění požadavku je nutné, aby výroba zůstala připojená k soustavě celou dobu, kdy se napětí v místě připojení nachází nad definovanou křivkou na obr. 3.2 (pro nesynchronní výroby). [7, 1]

Po návratu napětí do rozsahu pro trvalý provoz (kap. 3.2.3) musí být co nejrychleji (ale nejdéle do 1 s) obnovena dodávka buď 90 % výkonu před poruchou nebo aktuálně dostupného výkonu. [7]

RfG uvádí pouze rozsahy jednotlivých rohových bodů charakteristiky a ponechává na PDS určení konkrétních podmínek, za kterých musí výroba zůstat připojena. Charakteristika uvedená v PPDS je shodná s charakteristikou uvedenou v EN 50549-2, zobrazená na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Charakteristika schopnosti překlenout poruchu pro nesynchronní výrobný, převzato z [1]

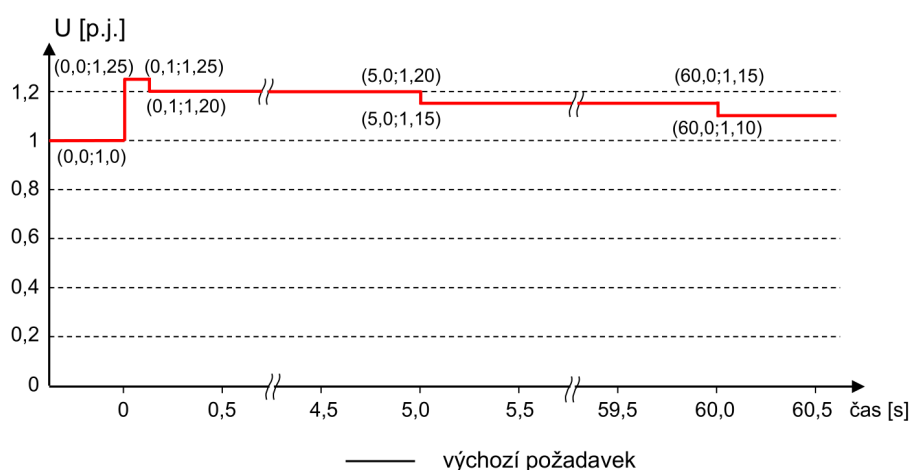
### 3.3.3 Překlenutí poruchy při krátkodobém nadpětí (OVRT)

Překlenutí poruchy při nadpětí RfG nespecifikuje.

PPDS i norma EN 50549 specifikuje charakteristiku dle obr. 3.3. Pokud se napětí nachází pod křivkou, VM se nesmí odpojit od soustavy. Tato charakteristika se považuje za minimální požadavek. [7, 1]

PPDS určuje také pro překlenutí nadpětí požadavek, aby výrobný byly schopny zůstat připojené k soustavě, pokud velikost napětí nepřekročí 120 % dohodnutého napětí po 1 s a 115 % dohodnutého napětí po dobu 60 s. [1]

V sítích NN se hodnotí nejvyšší fázové napětí (pokud je dostupné), jinak nejvyšší sdružené napětí. A v sítích VN a 110 kV se hodnotí nejvyšší sdružené napětí. [7, 1]



Obr. 3.3: Charakteristika schopnosti překlenout krátkodobé nadpětí, převzato z [1]

## 3.4 Odezva činného výkonu na změnu frekvence

PPDS, RfG i EN 50549-2 udávají povinnost pro výrobní všech typů připojené do DS povinnost snižovat svůj výkon v závislosti na frekvenci sítě.

### 3.4.1 Výkonová odezva při zvýšené frekvenci

RfG i PPDS požadují při zvýšené frekvenci schopnost VM aktivovat podporu frekvenční odezvy činného výkonu podle charakteristiky na obr. 3.4 s co nejkratší možnou prodlevou. Prodlevu delší než 2 s musí vlastní prodlevu zdůvodnit a provozovateli přenosové soustavy (PPS) dodat technické důkazy. [5, 1]

Nastavitelná prahová hodnota musí být mezi 50,2 a 50,5 Hz. [5, 1] Dle normy EN 50549-2 je rozsah nastavitelné prahové hodnoty 50,2 Hz – 52 Hz. [7] V České republice je aktuální výchozí nastavení 50,2 Hz. [1] Statika musí být nastavená mezi 2 % a 12 %. [5, 1] V České republice je aktuální výchozí nastavení 5 %. [1]

Při nadfrekvenci, kdy je  $f$  vyšší než  $f_1$ , musí výrobní modul snižovat výkon v souladu se statistikou  $s$ . A po dosažení minimální regulační úrovně může příslušný PPS požadovat, aby byl VM schopen buď pokračovat v provozu na této úrovni nebo aby dále snižoval činný výkon na výstupu. [5, 7]

Hodnota výkonu vypočtená pomocí rovnice (3.2) je výkonový limit výrobní při provozu při nadfrekvenci; snížení výkonu při poklesu dostupného výkonu pod hodnotu vypočtenou podle rovnice (3.2) je povoleno. [7]

Po aktivaci této funkce musí být pro výpočet používána v každém okamžiku aktuální frekvence sítě a výrobní je povinná reagovat na její změny. Tolerance dodávaného výkonu je v tomto případě  $\pm 10\%$  nominálního výkonu při rozlišení měření frekvence  $\pm 10$  mHz nebo méně. [7]

Pokud PDS nebo jiná odpovědná strana požaduje, musí být možné do charakteristiky dodat další prahovou hodnotu  $f_{stop}$ , která musí být nastavitelná od hodnoty alespoň 50 Hz do hodnoty  $f_1$ . V případě, že se dojde k poklesu výkonu z důvodu zvýšení frekvence nad hodnotu  $f_1$  a následnému snížení  $f$ , nesmí dojít k navýšení povoleného výkonu  $P_{max-limit}$  (jak je zobrazeno na obr. 3.5) dokud frekvence nepoklesne pod hodnotu  $f_{stop}$  alespoň na čas  $t_{stop}$ . [7] Tato charakteristika ale není dle [1] vyžadována.

Nastavení pro jednotlivé hodnoty charakteristiky dle jednotlivých dokumentů je vypsáno v tabulce 3.4.

Legenda k veličinám této kapitoly:

- $P_{ref}$  je referenční činný výkon, ke kterému je vztažena  $\Delta P$ :
  - pro synchronní výrobní moduly je  $P_{ref} = P_{max}$ ,
  - pro nesynchronní výrobní moduly je  $P_{ref} = P_M$ .

Tab. 3.4: Rozsahy a doporučené hodnoty charakteristiky P(f) [1, 7, 5]

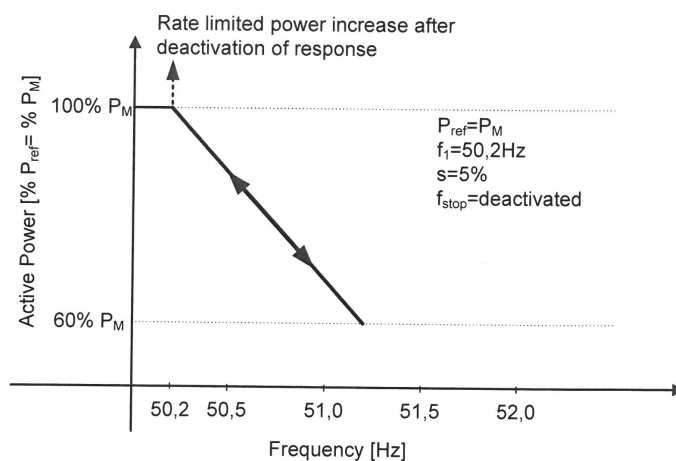
Parametr	Rozsah dle EN 50549-2	Výchozí nast. dle EN 50549-2	Rozsah dle RfG	Výchozí nast. dle PPDS
$f_1$	50,2 – 52 Hz	50,2 Hz	50,2 – 50,5 Hz	50,2 Hz
$f_{stop}$	50,0 Hz – $f_1$	–	–	–
$t_{stop}$	0 – 600 s	30 s	–	–
$s$	2 – 12 %	5 %	2 – 12 %	5 %
Prodleva aktivace	0 – 2 s	0 s	< 2 s	–

- $P_M$  je skutečná kapacita na výstupu v okamžiku dosažení frekvence  $f_1$  nebo maximální kapacita – stanoveno PPS.
- $\Delta P$  je změna činného výkonu na výstupu z výrobního modulu:

$$\Delta P = \frac{1}{s} \cdot \frac{|f_1 - f|}{f_n} \cdot P_{ref} \quad [W; -, Hz, Hz, Hz, W] \quad (3.1)$$

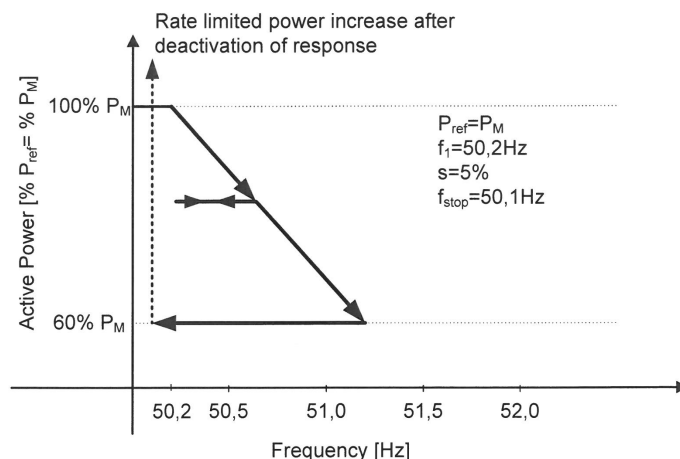
- $f_n$  je jmenovitá frekvence soustavy.
- $f$  je okamžitá frekvence v soustavě.
- $f_1$  je prahová hodnota frekvence.
- $s$  je statika.
- $P_{max-limit}$  je maximální dovolený dodávaný výkon při nadfrekvenci:

$$P_{max-limit} = P_M + \Delta P \quad [W; W, W] \quad (3.2)$$



Obr. 3.4: Charakteristika snížení činného výkonu při nadfrekvenci, převzato z [7]

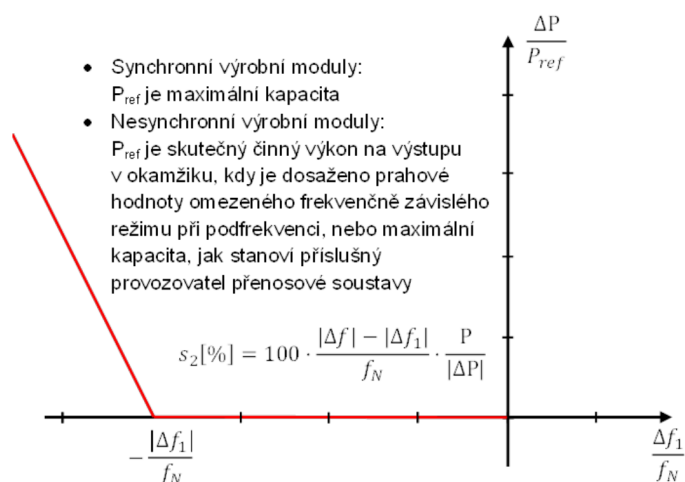




Obr. 3.5: Charakteristika snížení činného výkonu při nadfrekvenci s nastavenou deaktivační hranicí, převzato z [7]

### 3.4.2 Výkonová odezva při snížené frekvenci

Podle [1] i tabulky 3.1 musí být schopny moduly kategorie B2 (a také C, D) aktivovat poskytování frekvenční odezvy činného výkonu dle obr. 3.6, [7] tuto odezvu pro výrobní moduly bez akumulace pouze doporučuje.



Obr. 3.6: Charakteristika schopnosti odezvy činného výkonu při snížení frekvenci, převzato z [1]

## 3.5 Odezva výkonu na změnu napětí

### 3.5.1 Podpora napětí změnou dodávky jalového výkonu dle RfG

Pro VM typu B je uvedeno pouze, že PDS je oprávněn stanovit požadavek na schopnost výrobní dodávat jalový výkon.

RfG ale zmiňuje rozšiřující požadavky na dodávku jalového výkonu pro VM typu C v člancích [5], které dle tabulky 3.1 definují i požadavky na VM podkategorie B2.

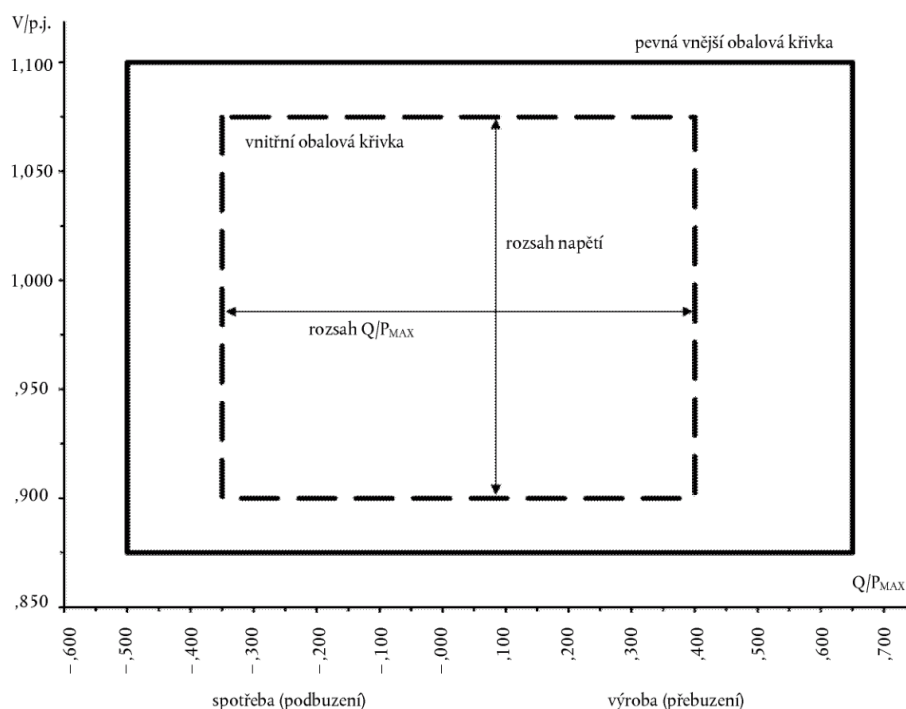
Nesynchronní výrobní modul musí být schopen dodávat jalový výkon automaticky – buď v režimu regulace napětí, regulace jalového výkonu nebo regulace účinníku, přičemž musí dosáhnout 90 % změny jalového výkonu do doby, kterou stanoví PDS v rozpětí 1 – 5 s. Pro účely regulace napětí musí být VM schopen přispívat k regulaci napětí v místě připojení výměnou jalového proudu se soustavou při zadané hodnotě napětí pokrývající 0,95 – 1,05 p.j.  $U_n$  se strmostí 2 – 7 % při kroku max. 0,5 %. V případě, že je hodnota napětí v místě připojení rovna zadané hodnotě, musí být jalový výkon na výstupu nulový. Zadané hodnoty napětí lze dosáhnout s pásmem necitlivosti (volitelným od 0 do  $\pm 5$  % referenční hodnoty napětí soustavy.

#### Dodávka jalového výkonu při maximální kapacitě

Príslušný PDS stanoví požadavky týkající se schopnosti dodávky jalového výkonu při různém napětí. Stanoví za tímto účelem profil  $U - Q/P_{max}$ , který může mít jakýkoliv tvar, v těchto mezích musí být nesynchronní VM schopen dodávat jalový výkon při své maximální kapacitě. Profil  $U - Q/P_{max}$  je stanoven s těmito zásadami:

- profil  $U - Q/P_{max}$  nesmí přesahovat vnitřní obalovou křivku znázorněnou na obr. 3.7,
- rozměry vnitřní obalové křivky musí být v rámci hodnot stanovených pro každou synchronně propojenou oblast, pro kontinentální Evropu platí maximální rozsah  $Q/P_{max} = 0,75$  a maximální rozsah napětí  $0,225 U_n$ ,
- vnitřní obalová křivka se musí nacházet v rámci limitů daných pevnou vnější obalovou křivkou,
- stanovený profil může mít jakýkoliv tvar, přičemž se zohlední potenciální náklady na zabezpečení schopnosti zajišťovat výrobu jalového výkonu při nadpětí a odběr jalového výkonu při podpětí.

Na obr. 3.7 jsou meze vymezeny napětím v místě připojení vyjádřeném v poměrných jednotkách, proti poměru jalového výkonu ( $Q$ ) k maximální kapacitě ( $P_{max}$ ). Poloha, velikost a tvar vnitřní polohové křivky jsou pouze ilustrační.



Obr. 3.7: Profil  $U - Q/P_{max}$  nesynchronního výrobního modulu při maximální kapacitě, převzato z [5]

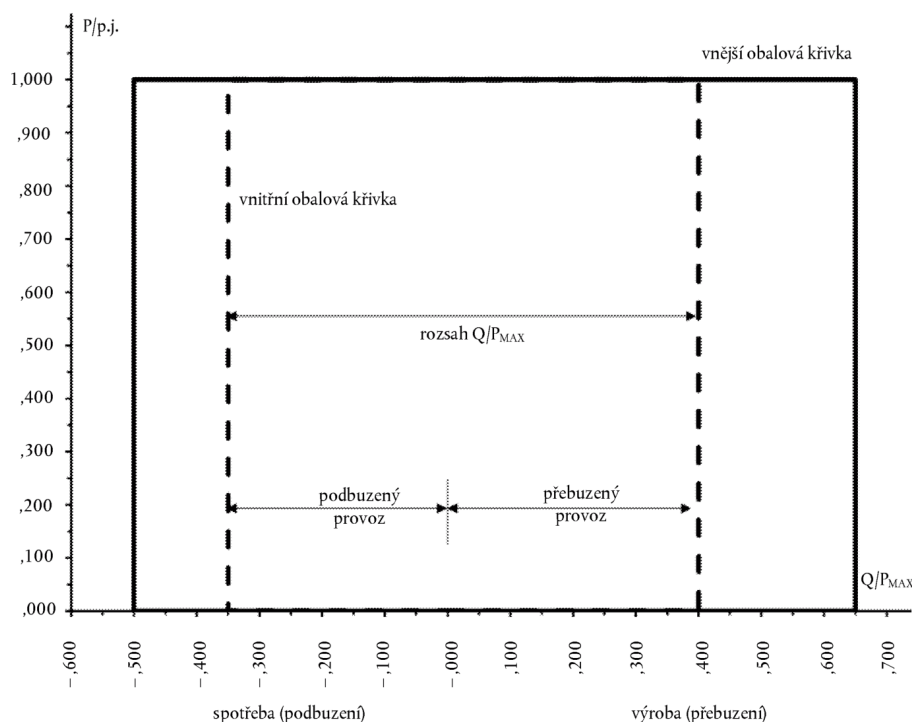
### Dodávka jalového výkonu při nižší než maximální kapacitě

Příslušný PDS stanoví požadavky týkající se schopnosti dodávky jalového výkonu při různém napětí. Stanoví za tímto účelem profil  $U - Q/P_{max}$ , který může mít jakýkoliv tvar, v těchto mezích musí být nesynchronní VM schopen dodávat jalový výkon při nižší než své maximální kapacitě. Profil  $P - Q/P_{max}$  je stanoven s těmito zásadami:

- profil  $P - Q/P_{max}$  nesmí přesahovat vnitřní obalovou křivku znázorněnou na obr. 3.8,
- rozměry vnitřní obalové křivky musí být v rámci hodnot stanovených pro každou synchronně propojenou oblast, pro kontinentální Evropu platí maximální rozsah  $Q/P_{max} = 0,75$ ,
- rozsah činného výkonu vnitřní obalové křivky musí při nulovém jalovém výkonu činit 1 p.j.,
- vnitřní obalová křivka se musí nacházet v rámci limitů daných pevnou vnější obalovou křivkou,
- stanovený profil může mít jakýkoliv tvar, přičemž se zohlední potenciální náklady na zabezpečení schopnosti zajišťovat výrobu jalového výkonu při nadpětí a odběr jalového výkonu při podpětí.

Na obr. 3.8 jsou meze vymezeny činným výkonem v místě připojení vyjádřeném

v poměrných jednotkách vzhledem k maximální kapacitě, proti poměru jalového výkonu ( $Q$ ) k maximální kapacitě ( $P_{max}$ ). Poloha, velikost a tvar vnitřní polohové křivky jsou pouze ilustrační.



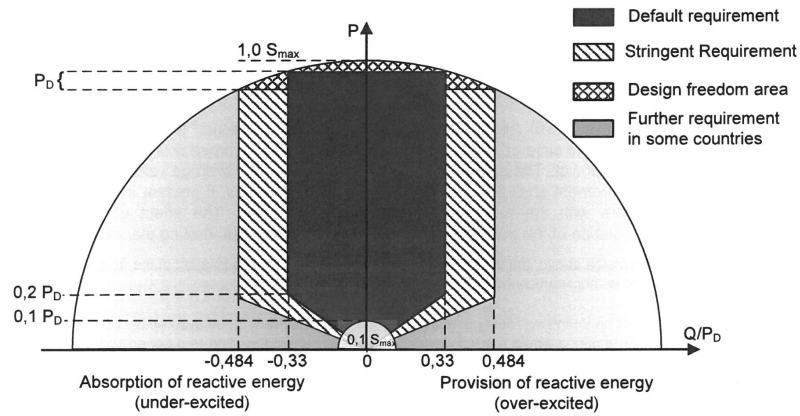
Obr. 3.8: Profil  $P - Q/P_{max}$  nesynchronního výrobního modulu při nižší než maximální kapacitě, převzato z [5]

### 3.5.2 Podpora napětí změnou dodávky jalového výkonu dle EN 50549-2

Provoz výroby nesmí vést ke odchylkám napětí mimo povolené limity určené národní legislativou. Výroby by měly přispívat k dodržení těchto limitů během běžného provozu.

Při provozu při běžném rozsahu frekvence a napětí (kapitoly 3.2.1 a 3.2.3) musí být výroby schopné splnit požadavky uvedené níže. Mimo běžné rozsahy musí výroby dodržet požadavky, jak je to technicky proveditelné, ačkoliv při provozu mimo běžné podmínky není explicitně dle EN 50549-2 žádná specifická přesnost požadována.

Výroby jsou povinny mít schopnost pracovat s rezervou jalového výkonu definovanou PDS. Výchozí požadavek jalového výkonu (dodávka i odběr) je 33 % maximálního činného výkonu ( $P_d$ ). Při poklesu činného výkonu pod 20 %  $P_d$  je oblast dostupného výkonu limitována minimálním účínkem 0,52. Přísný požadavek na

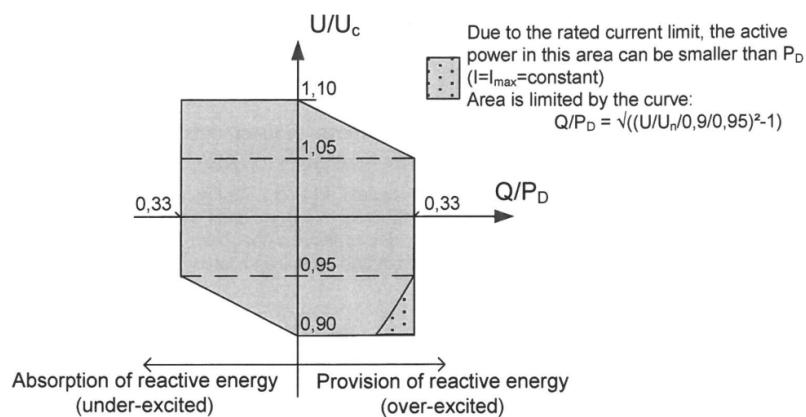


Obr. 3.9: Q(P) oblast při jmenovitém napětí, převzato z [7]

dostupný jalový výkon je až 48,4 %  $P_d$  při provozu s činným výkonem nad 20 %  $P_d$ . Při poklesu je oblast dostupného jalového výkonu limitována minimálním účínkem 0,38. Oblast vrchlíku nad hranicí  $P_d$  je ponechána pro případnou definici PDS.

Pokud výrobní pracuje s výkonem nižším než  $S_{min} = 10\%S_{max}$ , musí být jalový výkon poskytován s přesností  $\pm 2\%S_{max}$ . Při provozu s výkonem do hodnoty  $S_{min}$  jsou povoleny vyšší odchylky, ale vždy musí být tak malé jak je to technicky proveditelné a výměna jalového výkonu mezi výrobní a soustavou nesmí přesáhnout 10 %  $S_{max}$ .

Pokud se napětí v místě připojení odchyluje od jmenovitého napětí, ale nachází se v rozsahu normálních provozních podmínek, musí být rozsah dostupného jalového výkonu alespoň takový, jaký udává oblast na obr. 3.10. Pokud bude napětí v místě připojení pod 95 %  $U_n$ , je povoleno aby výrobní snížila jalový výkon dle podmínek v kapitole 3.2.3.



Obr. 3.10: Q(U) oblast při odchylce napětí od jmenovitého v místě připojení, převzato z [7]

Pokud PDS požaduje, může specifikovat způsob řízení dostupného jalového vý-

konu pro podporu napětí. Řízení musí být vztaženo k místu připojení výrobních jednotek nebo k místu připojení výroby, rozhodující je výkon výroby, specifikuje PDS.

Výrobní jednotka/výroba by měla být schopná řízení podle těchto charakteristik (není tímto vyloučen požadavek na dostupný jalový výkon uveden výše), může ale být aktivní pouze jeden z nich:

- žádaná hodnota  $Q$ ,
- $Q(U)$ ,
- $Q(P)$ ,
- žádaná hodnota  $\cos \varphi$ ,
- $\cos \varphi(P)$

Je doporučeno, aby byly ve výrobních implementovány všechny zmíněné charakteristiky, ale je nutné implementovat pouze charakteristiky specifikované PDS.

Konfigurace, aktivace a deaktivace řídicích charakteristik musí být dostupná v terénu a je nutné konfiguraci, aktivaci i deaktivaci zabezpečit proti neoprávněnému zásahu, pokud je toto vyžadováno PDS. Módy s manuálně nastavitelnými hodnotami musí být nastavitelné pomocí dálkového řízení výroby.

### **Módy s manuálně nastavitelnými hodnotami**

Nastavení konkrétních hodnot výstupního  $Q$  nebo  $\cos \varphi$  na výstupu musí být proveditelné přímo na výrobě i dálkově.

V případě změny nastavené hodnoty musí být hodnota na výstupu ustálena na nově zadané do 1 min.

Tyto způsoby řízení nelze úplně považovat za módy autonomního řízení, nereagují na elektrické parametry v místě připojení výroby. Lze je tedy použít jen s pevně nastavenými parametry nebo při dispečerském řízení.

### **Napětově závislý mód**

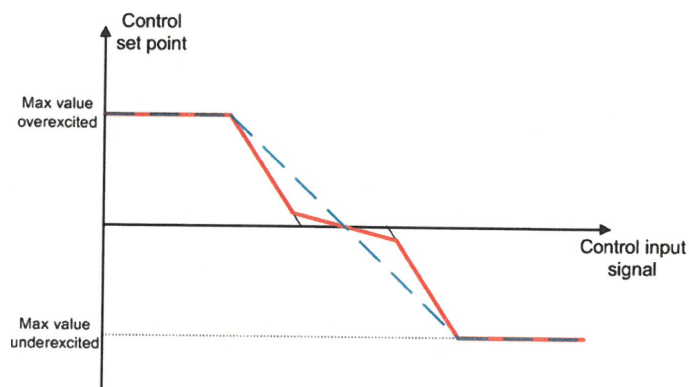
Napětově závislý mód  $Q(U)$  řídí výstupní jalový výkon v závislosti na hodnotě napětí měřené v místě připojení.

Neexistuje preferovaný způsob vyhodnocování napětí. Za volbu vhodné metody odpovídá projektant výroby. Měla by být použita jedna z následujících metod:

- sousledná složka napětí,
- průměr z jednotlivých měřených fázových nebo sdružených napětí,
- napětí každé fáze nezávisle pro určení potřebného jalového výkonu pro každou fázi.

Pro řízení jalového výkonu v závislosti na napětí by měla být k dispozici konfigurovatelná charakteristika s minimem, maximem a třemi čarami podle obr. 3.11.

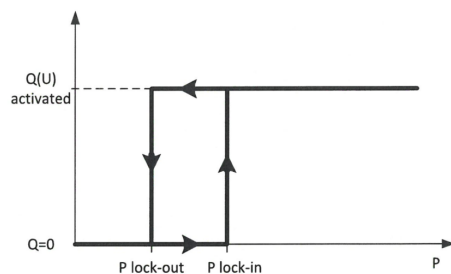
Dále by měla být definovatelná dynamická odezva systému, která by měla odpovídat přenosové funkci prvního řádu s nastavitelnou časovou konstantou od 3 do 60 s.



Obr. 3.11: Příklad charakteristiky pro řízení  $Q$ , respektive  $\cos \varphi$ , převzato z [7]

Omezení jalového výkonu při malém dodávaném činném výkonu by mělo být možné pomocí:

- nastavitelného minimálního účinníku v rozsahu  $0 - 0,95$ ,
- dvou hranic činného výkonu konfigurovatelných v rozsahu minimálně  $0\% - 100\% P_d$ . Hodnota výkonu „lock-in“ aktivuje funkci  $Q(U)$  a hodnota „lock-out“  $Q(U)$  deaktivuje. Charakteristika je zobrazena na obr. 3.12.

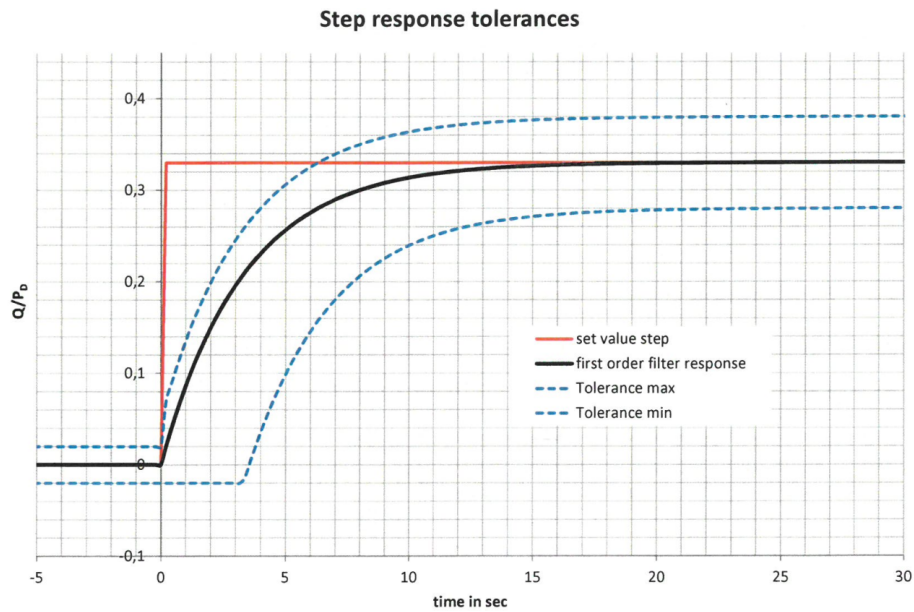


Obr. 3.12: Příklad charakteristiky deaktivaci  $Q(U)$  funkce, převzato z [7]

Dynamická odezva na nastavení jalového výkonu by měla odpovídat charakteristice na obr. 3.13 s maximální chybou  $\pm 5\% P_d$  se zpožděním do 3 s.

### Výkonově závislé módy

Výroba či spotřeba jalového výkonu je při módech  $\cos \varphi(P)$  a  $Q(P)$  řízena na základě dodávky činného výkonu do sítě. Nastavení by mělo odpovídat křivkám dle obr. 3.11.



Obr. 3.13: Příkald dynamické odezvy na skokovou změnu hodnoty  $Q(U)$  funkce s tolerančním pásmem s  $\tau = 3,33$  s, převzato z [7]

### 3.5.3 Rozbor možností podpory napětí řízením jalového výkonu

Mimo možnosti řízení uvedené v kap. 3.5.2, uvádí [1] i další možnosti řízení. Kompletní přehled uvažovaných možností řízení je tedy:

- Pevná hodnota jalového výkonu –  $Q$  fix
- Hodnota jalového výkonu závislá na napětí –  $Q(U)$
- Hodnota jalového výkonu závislá na činném výkonu –  $Q(P)$
- Pevná hodnota účinníku –  $\cos \varphi$  fix
- Hodnota účinníku závislá na napětí –  $\cos \varphi(U)$
- Hodnota účinníku závislá na činném výkonu –  $\cos \varphi(P)$
- Zadaná hodnota napětí –  $U$

V důsledku se možností řízení dělí na 2 kategorie:

1. řízení na zadanou hodnotu  $U$  v dohodnutém místě (nyní v místě připojení) – zadanou manuálně nebo dispečersky,
2. řízení na zadanou hodnotu  $Q$  – dle charakteristiky, pevně zadanou manuálně nebo dispečersky.

Nejdůležitějším rozdílem je reakce na vliv vstupní veličiny. V případě 1. kategorie se jedná o mód řízení, který reguluje jalový výkon v závislosti na citlivosti soustavy  $\frac{\partial U}{\partial Q}$  se zpětnou vazbou přímo napětí v místě připojení, takže při dostatečném regulačním rozsahu je možné teoreticky možná náprava napětí při libovolném stavu sítě. Nelze ale řídit velikost dodávaného nebo odebíraného jalového poměru, což může nepříznivě ovlivnit výkonové toky v soustavě. Rovněž při nízké citlivosti



soustavy na jalovou složku proudu (což dle kap. 1.4 je případ právě DS) může dojít k předčasnému vyčerpání regulačního rozsahu a při vyšší odchylce od zadaného napětí nemusí již výrobní poskytovat dodatečnou podporu.

Druhou kategorií je řízení jalového výkonu na základě nastavené charakteristiky. Výsledkem není úplná náprava napěťových poměrů, ale dílčí podpora pro udržení napětí v dovolených limitech. V závislosti na nastavení charakteristiky může být podpora nastavena při respektování citlivosti  $\frac{\partial U}{\partial Q}$  nebo ne. Protože ale síť není provozována v jednom provozním režimu, pro podporu s respektováním citlivosti by musela být charakteristika dynamicky zadávána, což odporuje principu autonomního řízení. V módech uvedených výše se nachází rovněž možnost řízení jalového výkonu na základě konkrétní zadané hodnoty jalového výkonu nebo účinníku – tyto způsoby není možné považovat za autonomní řízení, jedná se spíše o možnost dispečerského řízení.

Řízení jalového výkonu (popř.  $\cos \varphi$  na základě dodávaného činného výkonu může při vhodném nastavení kompenzovat vlivy výroby na distribuční soustavu, lze jej tedy považovat za autonomní řízení. Na rozdíl od napěťově řízených módů ale nedokážou reagovat na změny elektrických parametrů pocházející od jiných prvků soustavy, případně z jiných napěťových hladin. Také můžou při nevhodném nastavení charakteristiky velikost stav velikosti napětí ještě zhoršit, protože do smyčky regulace se hodnota napětí nepřivádí.

Protože právě náprava napěťových poměrů v soustavě patří k hlavnímu důvodu, proč se nad autonomním řízením jalového výkonu uvažuje, jeví se nejvhodnější módy regulující jalový výkon dle charakteristiky na základě napětí v místě připojení. Podpora jalovým výkonem opět nerespektuje citlivost  $\frac{\partial U}{\partial Q}$ , ovšem při správném nastavení je možné eliminovat nesprávnou míru podpory. Návaznost na napětí v místě připojení také zamezuje případům, kdy by výrobní prohlubovala napěťové problémy při vazbě vyráběného jalového výkonu na dodávku činného výkonu. Je možné také rovnoměrně rozložit podporu jalovým výkonem do celého rozsahu dovolených napětí.

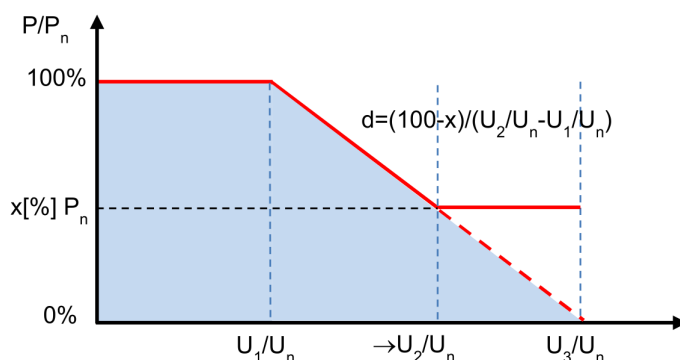
Protože není hlavním smyslem výroby dodávka jalového výkonu, je možné dodávku či odběr jalového výkonu přizpůsobovat více než dodávku činného výkonu a tím dynamičtěji reagovat na provozní parametry.

### 3.5.4 Snížení činného výkonu při zvýšení napětí sítě

Pro zamezení odpojování výroben při nadpětí z důvodu přepětových ochran mají výrobní dovoleno snížit dodávaný výkon v souladu s tzv.  $P(U)$  charakteristikou dle obr. 3.14 dle normy [7]. [1] požaduje implementaci této funkce pouze na úrovni hladině NN a konkrétní hodnoty funkce  $P(U)$  stanoví PDS na základě síťových podmínek, příp. studie připojitelnosti. V distribuční soustavě spravované ČEZ Distribucí

je výchozí volba charakteristiky dle obr. 3.16.

Tato funkce nesmí mít za následek skokové změny ani rozkmitání dodávaného výkonu. [1, 7]



Obr. 3.14: Charakteristika funkce  $P(U)$ , převzato z [1]

### 3.6 Požadavky na ochrany výrobních modulů

RfG ([5]) udává pouze některé obecné požadavky na systém chránění výroby, nekonkretizuje ale požadavky na ochrany.

Typy ochran, které může vyžadovat PDS udává [7]. V [7] jsou rovněž specifikovány příslušné meze, jakých hodnot může dosahovat nastavení daného typu ochrany v rozpadovém místě, nedoporučuje ale žádné konkrétní hodnoty nastavení parametrů. Obsahuje navíc rozšířené požadavky na frekvenční ochranu, které PPDS neobsahuje.

Rozsahy přebírá [1], která parametry doplňuje i doporučeními pro nastavené hodnoty, jak jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tab. 3.5: Rozsah provozního napětí výrobní připojené do sítě vn a 110 kV [1, 7]

Funkce	Rozsah nastavení dle EN 50549-2		Doporučené nastavení <sup>(2)</sup> dle PPDS	
	Mez vybavení	Čas	Mez vybavení	Čas
Nadpětí 3. stupeň $U_{>>}$	$1,00 - 1,30 U_n$	$0,1 - 5 \text{ s}$	$1,25 U_n$	$0,1 \text{ s}$
Nadpětí 2. stupeň $U_{>>}$	$1,00 - 1,20 U_n$	$0,1 - 100 \text{ s}$	$1,25 U_n$	$5 \text{ s}$
Nadpětí 1. stupeň $U_{>}$	$1,00 - 1,15 U_n$	$\leq 3 \text{ s}$	$1,15 U_n^{(1)}$	$\leq 60 \text{ s}$
Podpětí 1. stupeň $U_{<}$	$0,20 - 1,00 U_n$	$0,1 - 100 \text{ s}$	$0,7 U_n$	$0 - 2,7 \text{ s}$
Podpětí 2. stupeň $U_{<<}$	$0,20 - 1,00 U_n$	$0,1 - 5 \text{ s}$	$0,3 U_n (0,45 U_n)^{(3)}$	$\geq 0,15 \text{ s}$
Nadfrekvence 2. stupeň $f_{>>}$	$50 - 52 \text{ Hz}$	$0,1 - 5 \text{ s}$	–	–
Nadfrekvence 1. stupeň $f_{>}$	$50 - 52 \text{ Hz}$	$0,1 - 100 \text{ s}$	$51,5 \text{ Hz}$	$\leq 100 \text{ ms}$
Podfrekvence 2. stupeň $f_{<<}$	$47 - 50 \text{ Hz}$	$0,1 - 5 \text{ s}$	–	–
Podfrekvence 1. stupeň $f_{<}$	$47 - 50 \text{ Hz}$	$0,1 - 100 \text{ s}$	$47,5 \text{ Hz}^{(4)}$	$\leq 100 \text{ ms}$
Směr jalového výkonu a podpětí ( $Q \rightarrow$ & $U_{<}$ ) <sup>(5)</sup>	$0,70 - 1,00 U_n$	–	$0,85 U_n$	$0,5 \text{ s}$

- (1) Pro 1. stupeň nadpětí se použijí 10-minutové hodnoty odpovídající EN 50160. Výpočet 10- minutové hodnoty musí odpovídat 10 minutové agregaci podle EN 61000-4-30, třídě S. Tato funkce musí být založena na průměrné efektivní hodnotě napětí v intervalu 10 minut. Odchylka od EN 61000-4-30 spočívá v klouzavém měřicím okně. Pro porovnání s vypínací mezí postačí výpočet nové 10-minutové hodnoty nejméně každé 3 s.
- (2) Vypínací časy u nadpětí a podpětí je zapotřebí koordinovat s parametry FRT křivek.
- (3) Tento napěťový stupeň vyvolá rychlé odpojení od sítě při blízkých zkratech. Nastavení  $0,3 U_n$  se volí pro výrobní připojené do sítí 110 kV a napětí měřené na straně VN (odpovídá mu cca 15 %  $U_n$  v přípojném bodě. Nastavení  $0,45 U_n$  se volí pro výrobní připojené do sítí VN a při měření napětí na straně nižšího napětí.
- (4) Toto nastavení je závislé na výkonu výrobní a kmitočtové závislém přizpůsobení výkonu.
- (5) Ochrana se použije u výroben s instalovaným výkonem nad 30 kVA, nestanoví-li PDS jinak.

### 3.7 Implementace autonomních řídicích funkcí výroben ve VN dle požadavků PDS

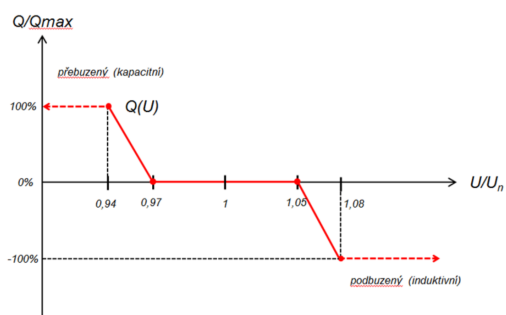
V rámci DS spravovanou EG.D je vyžadováno, aby výrobní splnily pravidla dle [5] – tedy aby byly schopné regulace dle funkcí popsaných výše. Dále je na výrobní nad 250 kW připojované do VN kladen požadavek pouze na regulaci na zadanou hodnotu účinnosti dle [38, 37]. Toto řízení je specifikováno v kapitole 4.2. Další pravidla specifikující podrobněji autonomní regulaci v rámci EG.D nebylo veřejně vydáno.

V rámci DS spravovanou PREdistribucí je vyžadováno, aby výrobní splnily pravidla dle [5] – tedy aby byly schopné regulace dle funkcí popsaných výše. Další pravidla specifikující podrobněji autonomní regulaci v rámci PREdistribuce nebylo

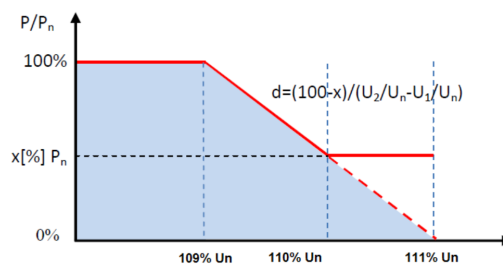
veřejně vydáno.

ČEZ Distribuce v [27] vyžaduje, aby výrobní měly implementované řídicí charakteristiky:

- $Q(U)$  v případě, že je výkon výrobní  $> 11$  kW – zákl. nastavení dle obr. 3.15,
- $P(U)$  v případě, že je výkon výrobní  $< 100$  kW – zákl. nastavení dle obr. 3.16,
- UVRT v případě, že je výkon výrobní  $> 11$  kW – zákl. nastavení dle obr. 3.2,
- $P(f)$  pro všechny výrobní – zákl. nastavení dle obr. 3.4.



Obr. 3.15: Základní nastavení  $Q(U)$   
ČEZ Distribuce, převzato z [27]



Obr. 3.16: Základní nastavení  $P(U)$   
ČEZ Distribuce, převzato z [27]

## 4 Koncepce a infrastruktura dispečerského řízení výrobních zařízení ve VN

Autonomní řízení dokáže napravovat poměry v síti v místě připojení.

Základním legislativním dokumentem definujícím koncept dispečerského řízení je vyhláška 79/2010 Sb., o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení. [9] definuje, že dispečerské řízení, které slouží pro zajištění spolehlivého a bezpečného chodu soustavy zahrnuje:

- přípravu provozu elektrizační soustavy,
- operativní řízení provozu elektrizační soustavy a
- hodnocení provozu elektrizační soustavy.

Dispečerské řízení provádí PDS prostřednictvím tzv. dispečerského pokynu, což jsou provozní instrukce technického dispečinku nebo operativní pokyny vydávané dispečinkem PDS. [9]

Provozní instrukce vydává dispečink po projednání s dotčenými účastníky trhu s elektřinou pro přípravu provozu, operativní řízení provozu, mezinárodní spolupráci a spolupráci dispečinků dle [9] pro:

- a) řízení toků elektřiny a bilanci elektrizační soustavy v oblasti
  1. regulace frekvence a předávaných výkonů,
  2. řízení napětí a regulace jalového výkonu,
  3. řízení podpůrných služeb,
  4. usměrňování spotřeby elektřiny,
  5. provozu části elektrizační soustavy v ostrovním provozu,
- b) řešení mimořádných situací a stavu nouze,
- c) nastavení a provoz automatizovaných systémů dispečerského řízení v oblasti
  1. dispečerských řídicích systémů,
  2. ochran přenosových a distribučních zařízení,
  3. ochran výroben připojených do příslušné soustavy,
  4. ochran odběrných elektrických zařízení ovlivňujících příslušnou soustavu,
  5. systémů pro automatické řízení příslušné soustavy,
  6. telekomunikací a zařízení pro přenos dat.

Dalším typem pokynu se dle [9] rozumí operativní pokyn, který musí být jednoznačný, srozumitelný a je předáván příslušným dispečinkům, která provádějí manipulace se zařízeními, které má dopad na příslušnou distribuční soustavu.

Operativní řízení DS zahrnuje dle [9]:

- a) řízení zapojení prvků soustavy,
- b) regulaci napětí a toků jalových výkonu v soustavě,
- c) atp.

PDS ČEZ Distribuce a EG.D mají vydány dokumenty popisující podrobněji požadavky dispečerského řízení v jim příslušných DS – [36] vydány ČEZ Distribucí a [37, 38] vydané EG.D. PREdistribuce nevydala veřejně podobné dokumenty. Těmito dokumenty upřesňují PDS podmínky, které budou kladeny na připojované výrobní. Dle dostupných dokumentů lze vidět, že ČEZ Distribuce i EG.D mají odlišné pohledy na regulaci výroben v DS na hladině VN, což je popsáno v kapitolách 4.1 a 4.2.

Je nutné ale dodat jaký je možné aktuálně považovat za rozsah DŘ. Dle [25, 26] jsou stávající zdroje na hladině VN využívány k regulaci toku jalového výkonu jen zřídka a obvykle pracují s účinnkem blízkým 1. Vzhledem k vyhodnocování toků jalového výkonu po měsíci a neexistující penalizaci za nepovolenou dodávku či odběr jalové energie do soustavy dochází rovněž u zdrojů k nedodržení povoleného účinnku.

## 4.1 Dispečerské řízení v distribuční soustavě ČEZ Distribuce

V roce 2018 byl dle [39] jalový výkon nejvíce vyroben v DS na hladině VN ČEZ Distribuce regulován dle povoleného rozsahu účinnku. Menší počet poté na konstantní napětí v místě připojení. Toto odpovídá informacím v [25]. Rovněž byla dle [39] vyhodnocena vhodnost regulace decentrálních zdrojů na zadané napětí v místě připojení a probíhá aktuálně projekt rozvoje DŘ právě na zadané napětí – rozvojový záměr dle [4] na období 2015 – 2023 s názvem „Dispečerské řízení napětí/jalového výkonu (U/Q regulace) pro zvýšení připojitelnosti decentrálních zdrojů el. energie do distribuční soustavy“mající za úkol osazená vývodů rozvoden VN měřením a zprovoznění funkcí zasílání povelů na decentrální zdroje.

Protože již v roce 2012 dle podmínek [?] byla povinnost výrobců implementovat mimo řízení na konstantní účinník i regulaci  $Q$  na zadané  $U$  v PM, je možné tuto regulaci implementovat s relativně minimálními náklady. [39]

ČEZ Distribuce dle [36] a [27] dělí požadavky na výrobní připojované do hladiny VN dle výkonů do kategorií:

- do 100 kW,
- nad 100 kW.

### 4.1.1 Výrobní do 100 kW

Výrobní musí být připravena pro dispečerské řízení výkonu v úrovních 0 % a 100 %  $P_{max}$  ve všech fázích současně pro přechodné snížení výkonu dodávky ve stavu nouze. Není ale požadován přenos měření a signalizace na dispečink. Rovněž má dispečink právo výrobní odpojit vypínačem od sítě.

Výchozím způsobem řízení výroben těchto výkonů jsou povely předávané pomocí hromadného dálkového ovládání (HDO). V případě, že se výrobná nachází v oblasti bez dostupného signálu HDO, bude pro povelování využita řídicí jednotce (ŘJ) v majetku PDS komunikující s dispečinkem šifrovaně pomocí mobilní sítě GSM/LTE.

### 4.1.2 Výrobní s výkonem nad 100 kW

Povelování pro řízení činného výkonu je stejně jako pro výrobní do 100 kW realizováno pomocí HDO, popř. komunikací s dispečinkem šifrovaně pomocí mobilní sítě GSM/LTE v případě, že je výrobná v oblasti bez dostupného signálu HDO.

Pokud se jedná o FVE nebo VTE, jsou stupně omezení činného výkonu 0 %, 30 %, 60 %, 100 %  $P_{max}$  a regulace mezi nimi musí probíhat bez přechodu na stupeň 100 %. V případě výroben ostatních typů jsou stupně v úrovních 0 %, 50 %, 75 %, 100 %  $P_{max}$ . Rovněž má dispečink právo výrobnu odpojit vypínačem od sítě.

Regulace jalového výkonu je prováděna na zadanou hodnotu napětí v PM dle požadavku dispečinku. Povely pro řízení jalového výkonu jsou ŘJ předávány pomocí mobilní sítě GSM/LTE. Výrobná musí být schopná plynulé regulace jalového výkonu v intervalu ( $\cos \varphi = \langle -0,9; 0,9 \rangle$ ) a udržet napětí v místě připojení co nejbližší zadanému. Nevyregulování napětí při vyčerpání rozsahu povoleného jalového výkonu se nepovažuje za chybu regulace.

V případě deaktivace Q/U regulace má výrobná povinnost regulovat na  $\cos \varphi = 1$ .

Výrobná rovněž předává dispečinku základě měření:

- průměrnou hodnotu ze sdružených napětí v PM,
- vyráběný činný výkon,
- vyráběný jalový výkon,
- účinník,
- a další elektrická a neelektrická měření dle [36].

## 4.2 Dispečerské řízení v distribuční soustavě EG.D

Komunikace probíhá s dispečinkem dle [38] a [37] pomocí mobilní sítě GSM/LTE.

Regulace činného výkonu FVE a VTE probíhá ve stupních 0 %, 30 %, 60 %, 100 %  $P_{max}$ ; regulace bioplynových a kogeneračních výroben ve stupních 0 %, 50 %, 70 %, 100 %  $P_{max}$ . Rovněž má dispečink právo výrobnu odpojit vypínačem od sítě.

EG.D rozděluje podmínky DŘ pro výrobní DS dle [38] a [37] dle výkonů do kategorií:

- nad 250 kW do 630 kVA,
- nad 630 kVA.

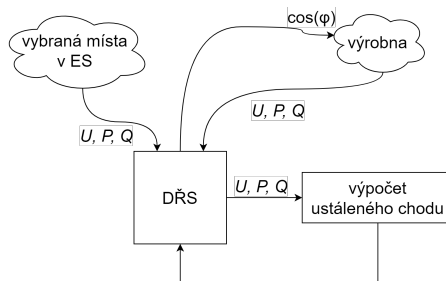
EG.D pro řízení v rámci kategorií popsaných výše uplatňuje řízení na dispečinkem zadávaný  $\cos \varphi$ . Ten je dle [40] zadáván pouze několikrát denně. Rovněž vzhledem k výpočtu žádaného účinníku, který není okamžitý, nemůže výrobní řízení dispečersky tímto způsobem reagovat operativně na podmínky v PM. Dovolené stupně  $\cos \varphi$  jsou -0,95, -0,97, 1, +0,97, +0,95.

Informace elektrických veličin předávané na dispečink jsou:

- hodnotu napětí mezi fázemi L1 a L2,
- vyráběný činný výkon,
- vyráběný jalový výkon.

V [23] je popsán algoritmus výpočtu žádaného účinníku výroben na základě výpočtu ustáleného chodu (UCH) dle obr. 4.1. Vstupy pro výpočet UCH jsou:

- aktuální bilance  $P$  a  $Q$  v síti měřená ve vybraných uzlech,
- měřená napětí v uzlech v síti, které jsou vybaveny systémem pro měření napětí; hodnoty nejsou měřené v reálném čase, ale v určitých intervalech a v případě velkého množství dat je možné eliminovat data zatížená velkou chybou měření,
- optimalizační kritéria:
  - zadané napěťové meze v dané uzlové oblasti,
  - dovolené proudové a výkonové toky přes transformátory,
  - limity PQ diagramů výroben
  - limity kompenzačních prvků.

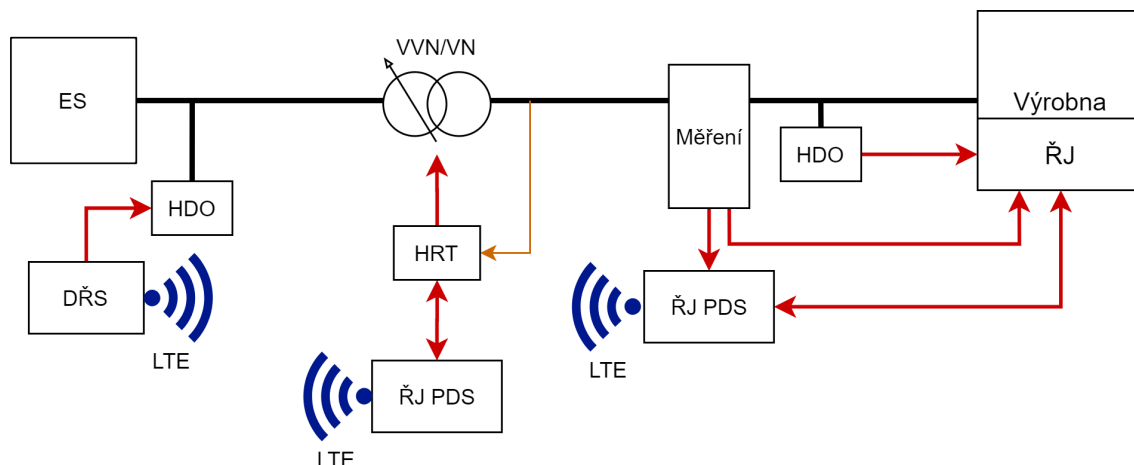


Obr. 4.1: Současný stav řízení decentralních výroben

### 4.3 Infrastruktura dispečerského řízení

Z informací popsaných výše lze tedy odvodit obecnou infrastrukturu dispečerského řízení na hladině VN, který je vyobrazena na obr. 4.2. Bohužel podrobnosti algoritmu a metodika rozdělování žádaného jalového výkonu výrobnám nejsou veřejně popsány. Pro účely simulace je dispečerské řízení realizováno formou eliminace toku jalového výkonu mezi soustavou 110 kV a soustavou 22 kV dle modelu v kap. 8.2.





Obr. 4.2: Obecné znázornění infrastruktury dispečerského řízení DS

## 4.4 Koncept integrace autonomního a dispečerského řízení

Rozborem v kapitole 3.5.3 bylo zvoleno, že simulovaným řízením jalového výkonu budou řízení na nastavenou hodnotu napětí a charakteristika  $Q(U)$  (popř.  $\cos \varphi(U)$ ) – ale v důsledku je chování podobné, bude uvažována  $Q(U)$ ). Zatímco řízení na zadanou hodnotu napětí již ze své podstaty kombinuje dispečerský způsob zadávání, charakteristika  $Q(U)$  je dle současných postupů používána jako čistě autonomní způsob řízení.

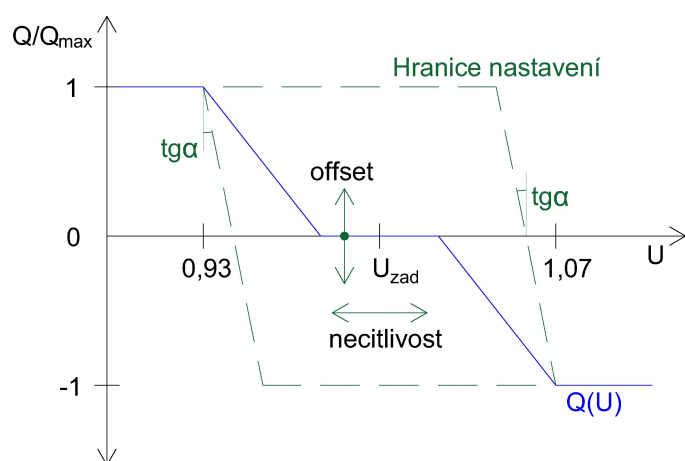
Pokud budou uvažovány určité hraniční možnosti charakteristiky dle kap. 6.5.3, lze uvažovat v zásadě o 3 parametrech, které jsou dynamicky dispečersky volitelné na základě příkladu na obr. 4.3:

- žádaná hodnota napětí,
- necitlivost,
- vysunutí v ose Y – neboli offset.

Představená parametrizace umožní specifikovat míru podpory výroby při ne-standardních stavech sítě nebo při náhlém požadavku zvýšení nebo snížení množství jalového výkonu v síti. Jsou nastaveny určité hranice, tyto jsou specifikované v kap. 6.5.3. Jejich cílem je ale zajištění, že při podpětí bude výroba dodávat jalový výkon do sítě a tím podporovat velikost napětí, naopak při předpětí musí výroba jalový výkon v místě připojení odebírat.

Necitlivost se vztahuje k žádané hodnotě napětí. V nastaveném rozpětí necitlivosti bude výroba dodávat nebo odebírat takový jalový výkon, jaký je žádaný při napětí v PM na úrovni žádaného. Offset umožňuje dispečersky ovlivňovat objem jalové energie při žádaném napětí v místě připojení a tím např. vyrovnávat bilanci

jalového výkonu v bodě styku soustavy se soustavou jiného napětí.

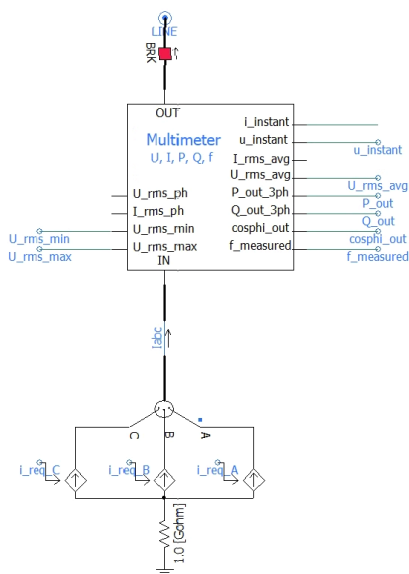


Obr. 4.3: Koncept dispečerské parametrizace  $Q(U)$

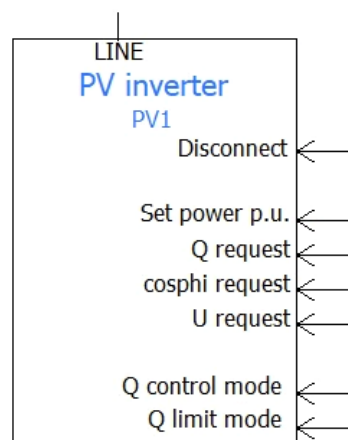
## 5 Implementace variantního modelu autonomního řízení VN zdrojů s integrací dispečerské vrstvy v PSCAD

Pro simulaci chování výroby i sítě byl zvolen program PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) ve verzi v4.6.3 umožňující simulaci elektromagnetických přechodových dějů v elektrických sítích. Jedná se o grafické rozhraní k výpočetnímu programu EMTDC (Electromagnetic Transients with DC Analysis) využívající jazyk FORTRAN, které je schopné rychlé a přesné časové analýzy. [29]

Jedná se o model nesynchronní výroby modelované jako zdroj proudu (na obr. 5.1) generující sinusový trojfázový signál vázaný pomocí fázového závěsu na napětí v místě přípojného bodu. Rezistor o hodnotě  $1\text{G}\Omega$  je připojen pro možnost měření fázových hodnot. Měnič má implementovány nezbytné řídicí charakteristiky dle kapitoly 3 pro respektování chování reálného střídače FVE. Blokové schéma modelu je zobrazeno na obr. 5.4 a modul v PSCADu na obr. 5.2.



Obr. 5.1: Elektrická část modelu výroby



Obr. 5.2: Blok výroby v PSCADU

Hlavní řídicí smyčku tvoří 4 bloky:

- Řízení činného výkonu (Řízení  $P$ ),
- Řízení jalového výkonu (Řízení  $Q$ ),
- Limitace jalového výkonu (Limitace  $Q$ ),
- Nastavení proudu výroby (Řízení  $i$ ).

Výše uvedené bloky obstarávají zpracování měřených signálů (na obr. 5.4 žlutě) a vyhodnocení řídicích signálů (na obr. 5.4 červeně) z předem nastavených charakteristik nebo parametrů (na obr. 5.4 fialově), popř. z externě zadaných hodnot (na obr. 5.4 modře).

Mezi podpůrné bloky patří:

- Blok měření  $U$ ,  $f$ ,  $\cos \varphi$ ,  $P$ ,  $Q$  (Měření),
- Blok pro inicializaci modelu a pro zpracování signálů ochrany – nyní implementována jen ochrana ROCOF (Inicializace a ROCOF ochrana).

Vztažné hodnoty využitě v celém modelu jako reference poměrných jednotek jsou pro:

- napětí ... jmenovité napětí  $U_n$ ,
- činný výkon ... jmenovitý výkon  $P_{max}$ ,
- jalový výkon ... jmenovitý výkon  $P_{max}$ , pokud není uvedeno jinak.

## 5.1 Struktura parametrizace

Nastavení parametrů modelu, které lze považovat za ustálené při běhu simulace probíhá v programu PSCAD za využití dostupného parametrizačního dialogu. Struktura nastavení je vyobrazena na obr. 5.3. Jednotlivé parametry pro sekce nastavení:

1. Inverter parameters ... jmenovité parametry,
  - Name ... název výroby, zobrazí se na modelu (např. „PV1“ na obr. 5.4),
  - Nominal voltage (kV) ... jmenovité sdružení napětí výroby, rovněž referenční napětí pro řídicí funkce,
  - Nominal power (MW) ... jmenovitý výkon výroby, nebo-li  $P_{max}$  dle [7],
  - Nominal frequency (Hz) ... jmenovitá frekvence,
  - Choose voltage control ... volba, zda bude pro řízení výroby využit průměr ze sdružených napětí nebo maximum, či minimum (popis v kapitole 5.4.3),
2. P(U) ... parametrizace řídicí funkce P(U),
  - Use P(U) ... volba, zda bude uplatněno řízení pomocí P(U),
  - Number of points ... počet použitých bodů pro vyhledávací tabulku (LUT) (kapitola 5.3.1),
  - U values (p.u.) ... signál s 5 prvky – zadané hodnoty napětí (osa X) v poměrných jednotkách (p.j.) pro LUT,
  - P values (p.u.) ... signál s 5 prvky – zadané hodnoty výkonu (osa Y) v p.j. pro LUT,
3. P(f) ... parametrizace řídicí funkce P(f),
  - Use P(f) ... volba, zda bude uplatněno řízení pomocí P(f),

- Disable  $P(f)$  if  $U$  (p.u.) is below ... nastavení úrovně napětí (p.j.), pod nížž dojde k deaktivaci  $P(f)$ ,
  - Number of points ... počet použitých bodů pro LUT,
  - Which point is breakpoint? ... index bodu v charakteristice, který odpovídá lomu charakteristiky – limitace výkonu při zvýšení frekvence dle kap. 3.4.1)
  - $f$  values (Hz) ... signál s 5 prvků – zadané hodnoty frekvence (osa X) pro LUT,
  - $P$  values (p.u.) ... signál s 5 prvků – zadané hodnoty výkonu (osa Y) v p.j. pro LUT,
  - Use thresholding? ... volba, zda použít volitelnou funkci deaktivací hranice dle kap. 3.4.1,
  - Deactivation threshold frequency (Hz) ... hranice deaktivace limitace výkonu  $f_{stop}$ ,
  - Deactivation time (s) ... čas  $t_{stop}$  v s,
4. Q control functions ... parametrizace řídicích funkcí jalového výkonu dle kap. 5.7,
- Number of points ... počet použitých bodů  $Q(U)$  charakteristiky – var. 1,
  - $U$  values (p.u.) ... signál s 5 prvků – zadané hodnoty napětí (osa X) v p.j.,
  - $Q$  values (p.u.) ... signál s 5 prvků – zadané hodnoty výkonu (osa Y) v p.j.,
  - $Q(U)$  alternative input settings ... signál s 8 prvků pro alternativní zadání  $Q(U)$  charakteristiky dle kap. 5.7.1,
5. Q limits ... parametrizace limitačních funkcí jalového výkonu,
- Minimal cosphi ... minimální  $\cos \varphi$  pro „V“ charakteristiku  $Q(P)$ ,
  - Number of points ... počet použitých bodů  $Q(P)$  oblasti,
  - $P$  values (p.u.) ... signál s 10 prvků – body výkonu v p.j. (osa X),
  - $Q$  values + (p.u.) ... signál s 10 prvků – korespondující hodnoty maximální dodávky jalového výkonu do sítě v p.j.,
  - $Q$  values - (p.u.) ... signál s 10 prvků – korespondující hodnoty maximálního odběru jalového výkonu ze sítě v p.j.,
6. Protection and ramp ... parametrizace implementovaných ochranných funkcí a ramp,
- Wait time after disconnect. (s) ... zpoždění v s, po kterém je výrobně povoleno opětovné připojení po obdržení povelu,
  - Ramp for active power (p.u./s) ... maximální strmost nárůstu činného výkonu v p.j./s,
  - Use ROCOF? ... použití ochrany ROCOF,

- ROCOF limit (Hz/s) ... maximální povolený nárůst frekvence,
  - Moving window time (s) ... ověřovací okno pro detekci nárůstu frekvence,
  - Start of ramp (s) ... inicializační čas modelu při startu simulace,
7. Regulators ... parametrizace regulátorů a zpoždění žádaných hodnot,
- Proportional gain ... zesílení proporcionálního členu PI regulátoru,
  - Integral gain ... zesílení integrálního členu PI regulátoru,
  - Time constant (s) ... časová konstanta přenosové funkce prvního řádu pro zpoždění žádané hodnoty.

Inverter parameters	P (U)
<b>General</b> Name PV2 Nominal voltage L-L (kV) 22 Nominal power (MW) 2 Nominal frequency (Hz) 50 <b>Voltage select</b> Choose control voltage: average	<b>General</b> Use P(U)? Yes <b>P(U) function points</b> Number of points 3 U values (p.u.) PU_U_PV2 P values (p.u.) PU_P_PV2
<b>P (f)</b> <b>General</b> Use P(f)? No Disable P(f) if U (p.u.) is below 0.5 <b>P(f) function points</b> Number of points 3 Which point is breakpoint? 2 f values (Hz) Pf_f_PV2 P values (p.u.) Pf_P_PV2 <b>P(f) thresholding</b> Use thresholding? Yes Deactivation threshold frequency (Hz) 50.1 Deactivation time (s) 5	<b>Q control functions</b> <b>Q(U) points</b> Number of points 3 U values (p.u.) QU_U_PV2 Q values (p.u.) QU_Q_PV2 <b>Q(U) points alternative input</b> Q(U) alternative input settings QU_alt_PV2
<b>Q limits</b> <b>Minimal cosphi limit (V char)</b> Minimal cosphi 0.90 <b>Q(P) area</b> Number of points 3 P values (p.u.) QP_P_values_PV2 Q values + (p.u.) QP_Q_values_PV2 Q values - (p.u.) QP_Q_values_PV2	<b>Protection and ramp</b> <b>General</b> Wait time after disconnect. (s) 2 Ramp for active power (p.u./s) 0.033 <b>ROCOF</b> Use ROCOF? No ROCOF limit (Hz/s) 2 Moving window time (s) 0.5 <b>Start-up ramp</b> Start of ramp (s) initTime
<b>Regulators</b> <b>Active power regulator</b> Proportional gain 0 Integral gain 60 <b>Reactive power regulator</b> Proportional gain 0 Integral gain 60 <b>Requested cosphi regulator</b> Proportional gain 0 Integral gain 50 <b>Requested voltage regulator</b> Proportional gain 0 Integral gain 60 <b>Time constants for delay</b> Time constant for P reg (s) 0.5 Time constant for Q, U, cosphi reg (s) 1	

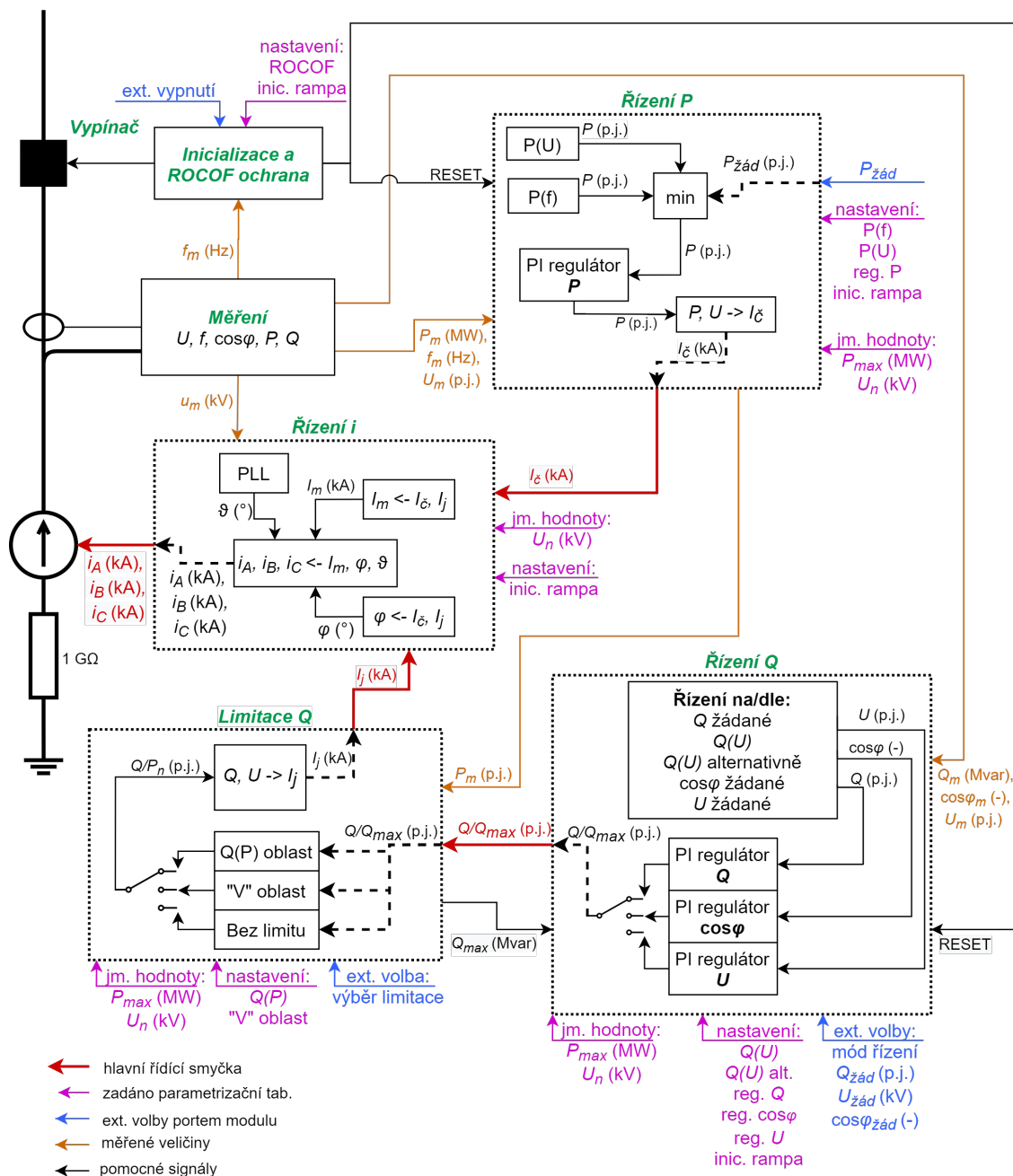
Obr. 5.3: Struktura nastavení modelu výroby

## 5.2 Externí řízení

Lze také využívat ovládání modelu v závislosti na externím požadavku. Pro tyto účely jsou vyvedeny pro jednoduché řízení následující vstupní signály (model na obr. 5.2):

1. Disconnect ... deaktivace výroby:
  - 0 ... aktivace
  - 1 ... deaktivace
2. Set power p.u. ... žádanou hodnotu činného výkonu v p.j.,
3. Q request ... žádanou hodnotu jalového výkonu v p.j. dle vybrané limitace  $Q$ ,
4. cosphi request ... žádanou hodnotu  $\cos \varphi$ ,
5. U request ... žádanou hodnotu  $U_{\text{žád}}$  (kV),
6. Q control mode ... výběr řízení jalového výkonu:
  - 0 ... na  $Q_{\text{žád}} = 0$ ,
  - 1 ... na žádaný  $Q$ ,
  - 2 ... dle  $Q(U)$  funkce zadané max. 5 body,
  - 3 ... dle alternativní  $Q(U)$  funkce zadané 2 body, žádanou hodnotou napětí, pásmem necitlivosti a vysunutím charakteristiky v ose jalového výkonu,
  - 4 ... na žádaný  $\cos \varphi$ ,
  - 5 ... na žádané napětí v PM,
7. Q limit mode ... výběr limitace  $Q$  – dle kapitoly 5.8:
  - 0 ... bez limitu, žádaná hodnota  $Q$  (z kterékoliv funkce řízení  $Q$ ) je  $Q_{\text{žád}} / P_n$ ,
  - 1 ... limitace  $Q_{\text{max}}$  symetrickou charakteristikou do „V“ (tedy omezení minimálním účíníkem) dle [1], žádaná hodnota  $Q$  (z kterékoliv funkce řízení  $Q$ ) je  $Q_{\text{žád}} / Q_{\text{max}}$ ,
  - 2 ... limitace  $Q_{\text{max}}$  charakteristikou dle kapitoly 3.5.2, žádaná hodnota  $Q$  (z kterékoliv funkce řízení  $Q$ ) je  $Q_{\text{žád}} / Q_{\text{max}}$ .





Obr. 5.4: Blokové schéma variantního modelu nesynchronní výrobní

## 5.3 Popis vybraných vlastních bloků využívaných v ostatních řídicích funkcích modelu výroby

Knihovna bloků (master library) vytvořená tvůrci programu PSCAD disponuje velkým množstvím komponent pro tvorbu jak elektrických obvodů, tak pro tvorbu logických řídicích obvodů. Obsahuje např:

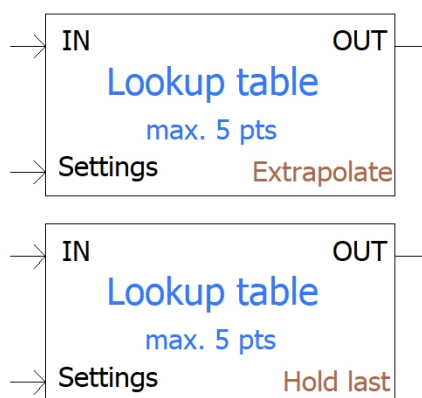
- pasivní součástky (rezistory, kondenzátory, cívky ...),
- matematické funkce (integrátor, LUT, matematické funkce ...),
- modely částí elektrizační soustavy (transformátory, modely vedení ...),
- modely binární logiky (S-R latch, AND, OR ...),
- atd.

Nicméně i přes rozsáhlou základní výbavu bylo nutné vytvořit některé funkce z důvodu např. limitace nastavení vestavěných funkcí či chybějící funkcionality.

### 5.3.1 Vyhledávací tabulka (LUT)

Vyhledávací tabulka přijímá body pro nastavení charakteristiky (volitelný rozsah 1 – 5 bodů; je nutné využívat body „X“ i „Y“ vzestupně a za nevyužité body lze dosadit libovolnou hodnotu) a následně interpoluje žádanou hodnotu v závislosti na hodnotě vstupu. Interpolace je počítána na základě rovnice (5.1). Při extrapolaci vně rozsahu osy X je použita směrnice vždy nejbližšího nastaveného úseku. V rámci parametrizace lze nastavit možnost „Hold last“, případně „Extrapolate“ pro nastavení chování vně nastavený rozsah osy X (viz obrázky 5.5 a 5.6). Skript v jazyce FORTRAN je přiložen v příloze A. Modul přijímá 2 vstupy:

- IN ... hodnota na ose X při žádané hodnotě charakteristiky na ose Y,
- Settings ... signál s 11 prvků dle tabulky 5.1.



Obr. 5.5: Modul vyhledávací tabulky

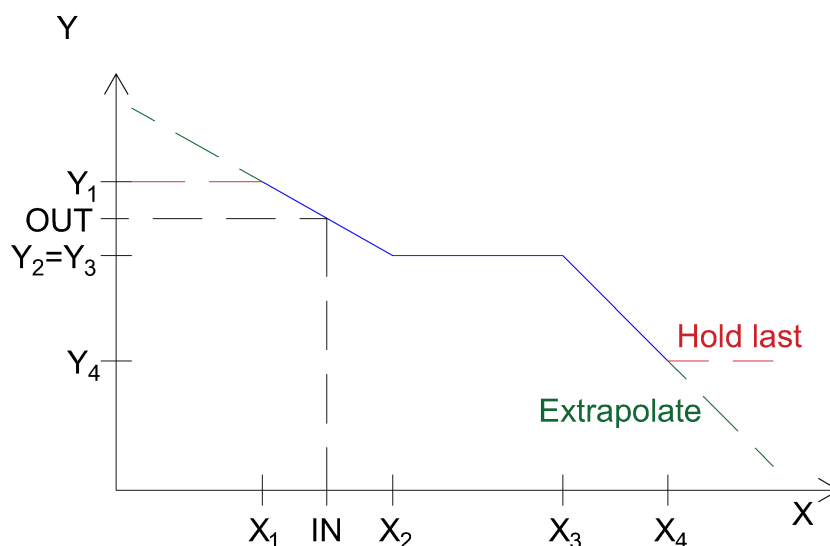
Tab. 5.1: Charakteristika signálu pro port „Settings“ modulu LUT

Pořadí	Popis
1	počet bodů charakteristiky
2 – 6	$X_1 - X_5$ (je nutné zadávat hodnoty „X“ vzestupně)
7 – 11	$Y_1 - Y_5$

Pro interpolaci je využit následující vztah:

$$\text{OUT} = Y_{n-1} + \frac{Y_n - Y_{n-1}}{X_n - X_{n-1}} \cdot (\text{IN} - X_{n-1}) \quad (5.1)$$

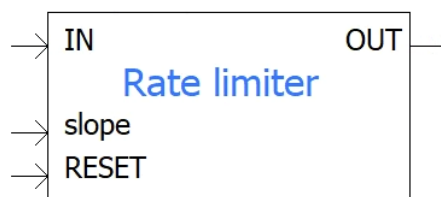
kde:  $n$  ... pořadí nejbližšího prvku, který splňuje  $X_n \geq \text{IN}$ .



Obr. 5.6: Příklad nastavení charakteristiky vyhledávací tabulky

### 5.3.2 Limitace nárůstu/poklesu

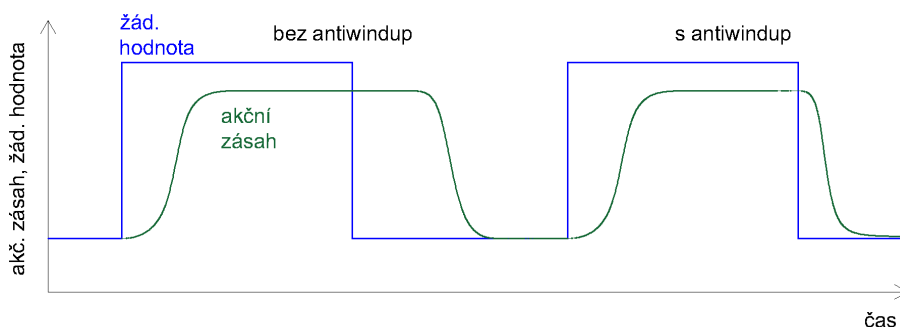
Vytvořený blok kontroluje, aby se hodnota na výstupu nezvyšovala rychleji než povoleno (rychlost nárůstu / poklesu je definovaná signálem „slope“ s jednotkou  $s^{-1}$  – viz obrázek 5.7). V této funkci se vytvořený modul neliší od vestavěného modulu „Rate limiter“ dostupného z knihovny bloků. Pro správnou funkčnost modelu bylo nutné přidat funkci resetování a reinicializace (hodnota 1 přivedená na port „RESET“ znamená inicializaci) – nutné při vypnutí výroby nebo vybavení ochrany. Skript je přiložen v příloze B.



Obr. 5.7: Modul limitace nárůstu

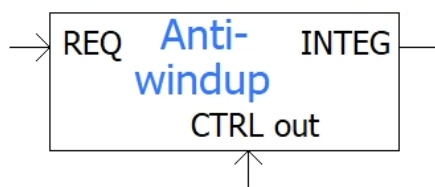
### 5.3.3 Antiwindup řešení pro integrátor

Pro řízení správného výstupního výkonu výrobní jsou použity proporcionálně-integrační regulátory. V případě, že je ale regulační odchylka větší než je regulátor schopen vykompenzovat, integrátor neustále načítá odchylku a v případě, že se žádaná hodnota opět vrátí do pásma, kdy je ji regulátor schopen vyregulovat, trvá určitou dobu než je chyba načtená integrátorem odintegrována, příklad na obr. 5.8.

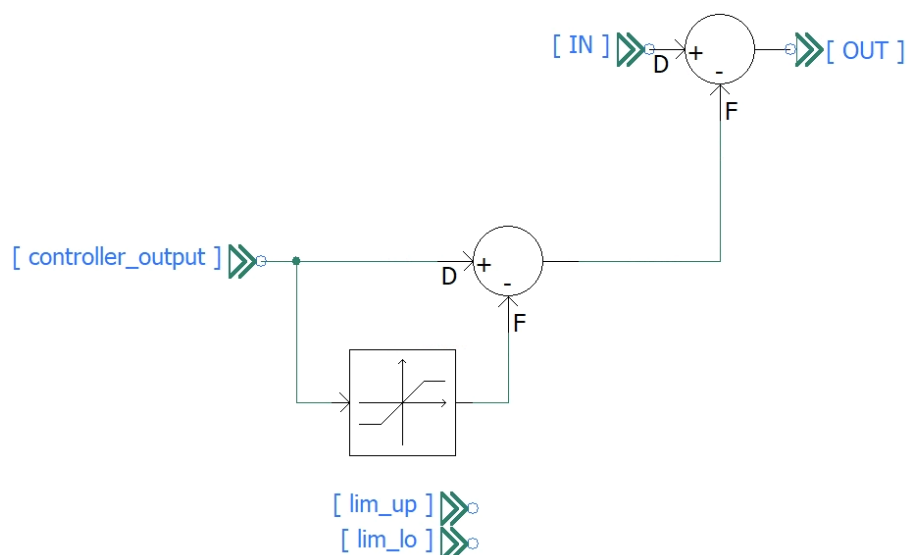


Obr. 5.8: Ilustrace efektu antiwindup

Jako řešení byl vybrán způsob popsáný v [31] – detekce saturace. Na vstupní port integrátoru se přivede signál s žádanou hodnotu, od něž je odečten rozdíl před a za limitací akčního zásahu. Na vstup integrátoru se tedy přivádí rozdíl odchylky a hodnoty mimo limit. Model v PSCADu je na obrátku 5.10. V parametru modelu jsou limity nastavitelné. Na vstupní port „CTRL out“ je přiveden signál z regulátoru před limitací (obr. 5.9).



Obr. 5.9: Antiwindup blok



Obr. 5.10: Antiwindup schéma

## 5.4 Měření

Pro správné fungování modelu a vyhodnocení dat je nutné mít správnou metodiku měření elektrických veličin. V modelu je důležité správné vyhodnocení následujících veličin:

- elektrický proud  $I$ ,
- elektrické napětí  $U$ ,
- činný výkon  $P$ ,
- jalový výkon  $Q$ ,
- frekvence  $f$ .

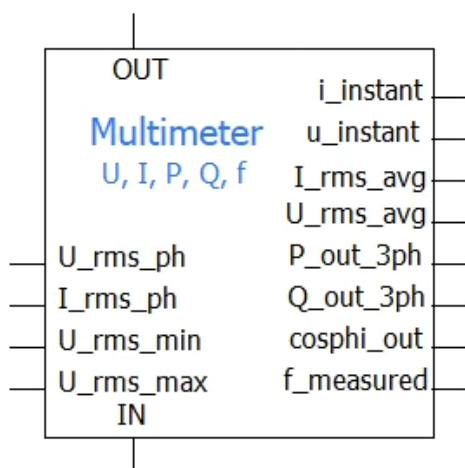
Problematicku měření elektrických veličin lze považovat za velice rozsáhlou, proto v případě simulace popsané v této práci lze zavést několik předpokladů:

- výrobní, zátěž i síť jsou symetrické,
- v síti se vyskytují v ustáleném stavu pouze signály první harmonické,
- frekvence první harmonické se může měnit.

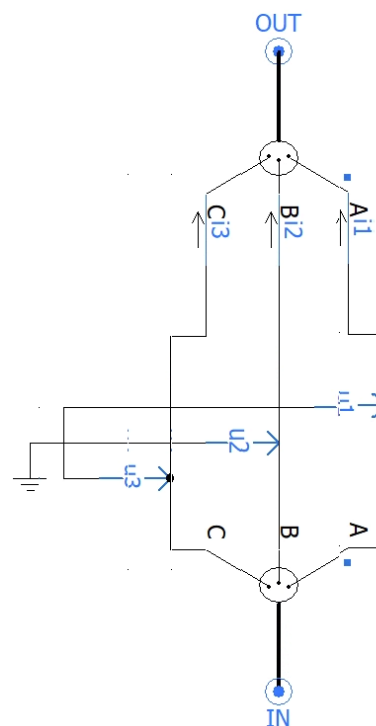
Blok sestavený z dostupných bloků v knihovně PSCADu je vyobrazený na obr. 5.11. Metodiky měření jednotlivých veličin jsou rozebrány v kapitolách níže. Podrobnosti výstupních signálových portů jsou uvedeny v tabulce 5.2. Porty IN a OUT představují rovněž i kladný směr měření výkonu (ze směru „IN“ do směru „OUT“). Signály pro zpracování dle kapitol níže jsou získávány pomocí bloků „Ammeter“ a „Voltmeter to Ground“ z knihovny bloků dle obr. 5.12.

Tab. 5.2: Charakteristika výstupních portů modulu měření

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
u_instant	3	okamžité hodnoty fázových napětí (a, b, c)	kV
U_rms_ph	3	sdružená efektivní hodnota napětí mezi každými fázemi (a-b, b-c, c-a)	kV
U_rms_avg	1	průměrná hodnota efektivních hodnot sdružených napětí	kV
U_rms_min	1	minimální hodnota z efektivních hodnot sdružených napětí	kV
U_rms_max	1	maximální hodnota z efektivních hodnot sdružených napětí	kV
i_instant	3	okamžité hodnoty fázových proudů (a, b, c)	kA
I_rms_ph	3	efektivní hodnota fázových proudů (a, b, c)	kA
I_rms_avg	1	průměrná efektivní hodnota fázových proudů	kA
P_out_3ph	1	3f činný výkon	MVA
Q_out_3ph	1	3f jalový výkon	Mvar
cosphi_out	1	účinník	–
f_measured	1	frekvence	Hz



Obr. 5.11: Modul měření sestavený v PSCADu



Obr. 5.12: Měření okamžitých hodnot proudů a napětí

### 5.4.1 Měření frekvence

Frekvenci lze definovat u událostí, které probíhají periodicky s pevným časovým intervalem. [33] Dle předpokladů výše je ale model tvořen s možností změny frekvence, toto komplikuje možnosti měření. V případě, že by byl model tvořen pro použití při konstantní frekvenci, bylo by možné pro měření využít měření doby mezi průchody signálu nulou a výpočet frekvence dle rovnice (5.2). Problémem využití tohoto způsobu estimace frekvence je měření frekvence při nějakém přechodovém stavu v síti, popř. při spínání, kdy je možné, že se v průběhu napětí nebo proudu objeví více průchodů nulou za 1 periodu.

$$f = \frac{1}{t_1 - t_0} \cdot \frac{1}{2} \quad [\text{Hz}; \text{s}, \text{s}] \quad (5.2)$$

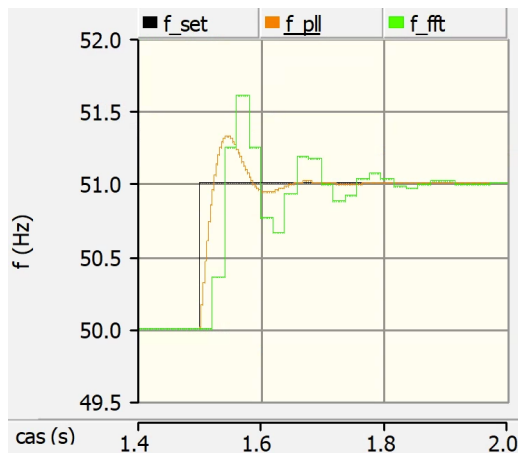
kde:  $f$  ... měřená frekvence

$t_0$  ... čas průchodu nulou

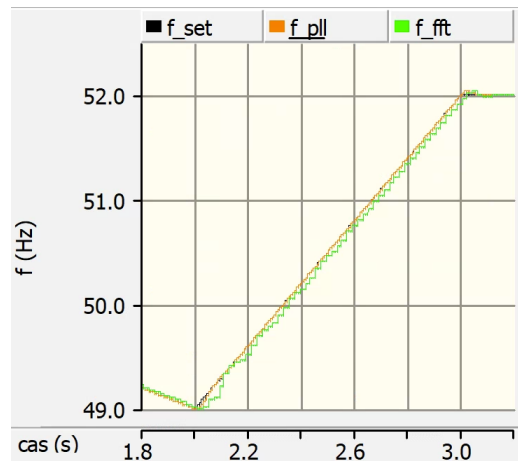
$t_1$  ... čas následujícího průchodu nulou stejné fáze

PSCAD ve své knihovně nabízí 2 bloky, které jsou schopné určit frekvenci pomocí jiných způsobů nezávislých na detekci okamžiků průchodu nulou. Těmito bloky jsou (vizualizace funkce při skokové změně na obr. 5.13 a při lineární změně na obr. 5.14):

- rychlá Fourierova transformace (FFT) ... estimace frekvence pomocí frekvenčního skenování,
- fázový závěs (PLL) ... estimace frekvence na základě snahy regulátoru o nulovou fázovou odchylku signálu generovaného vnitřním napěťově řízeným oscilátorem.

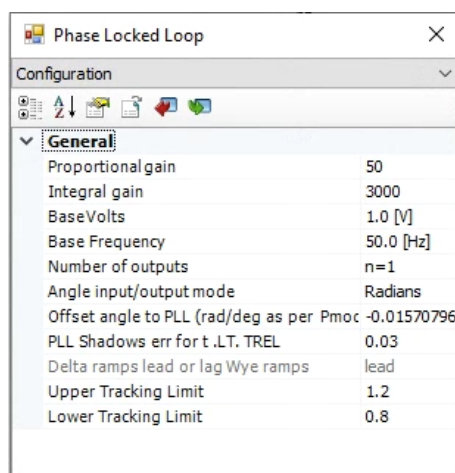


Obr. 5.13: Estimace frekvence při skokové změně pomocí FFT a PLL



Obr. 5.14: Estimace frekvence při lineární změně pomocí FFT a PLL

Měření frekvence je rovněž využito pro řídicí funkci  $P(f)$  a ochranu před rychlým nárůstem frekvence. Není tedy vhodné, aby měřená frekvence byla skokově se měnící jako výstup měřené frekvence bloku FFT. Frekvence sítě se sice skokově nemění, ale i při lineárním nárůstu je vhodnější výstupní frekvence bloku PLL. Pro měření je využit tedy blok PLL s parametry dle obr. 5.15, zapojení lze vidět na obr. 5.18.

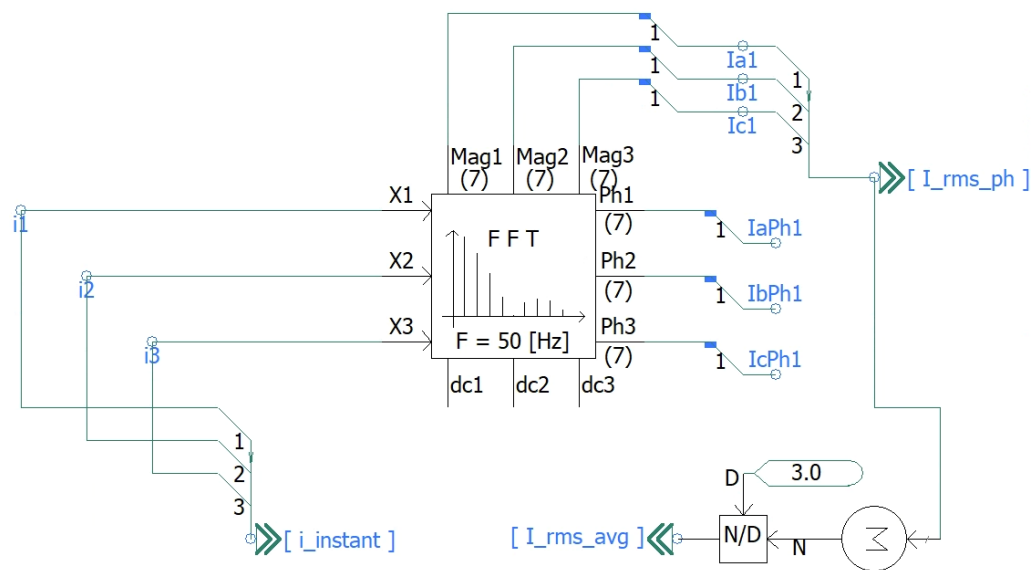


Obr. 5.15: Parametry PLL

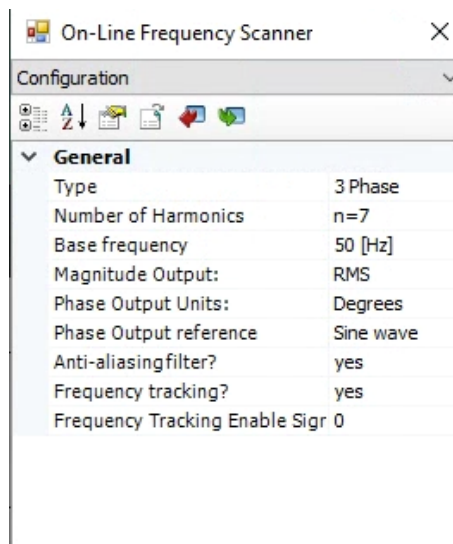
## 5.4.2 Měření elektrického proudu

Pro měření průměrné efektivní hodnoty proudu je využit blok FFT (zapojení na obr. 5.16), do kterého jsou přivedeny signály okamžitých hodnot fázových proudů měřené. Tímto je zaručeno měření efektivní hodnoty správné frekvence sítě kromě okamžiků, kdy se v síti objeví změna frekvence a frekvenční sledování FFT nedokončilo estimaci správné frekvence. V těchto případech se objeví rozlévání energie měřeného signálu do přilehlých vyšších harmonických složek a přesnost měření se snižuje až do okamžiku kdy se hledaná frekvence shoduje se skutečnou. Nastavení bloku FFT pro měření proudu je na obr. 5.17.





Obr. 5.16: Zapojení bloku FFT pro měření proudu

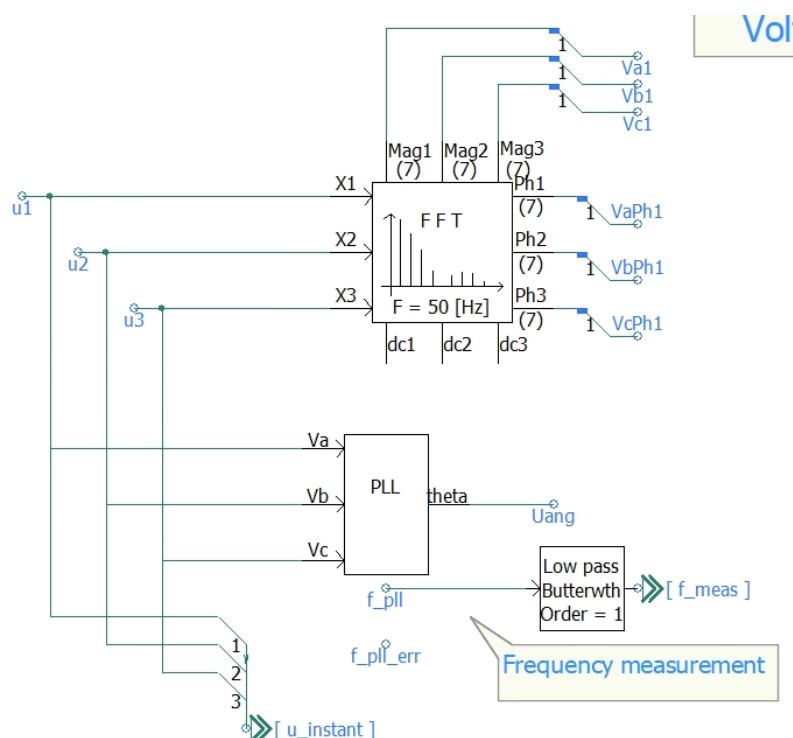


Obr. 5.17: Parametry bloku FFT pro měření proudu

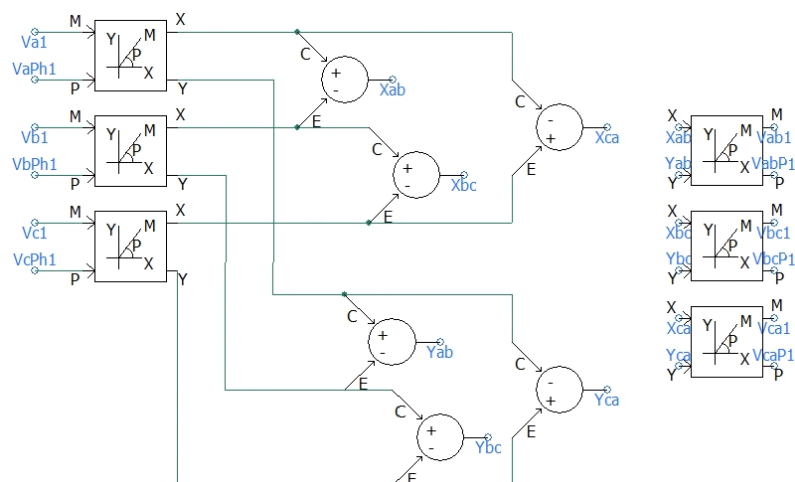
### 5.4.3 Měření elektrického napětí

Pro měření fázové efektivní hodnoty proudu je využit blok FFT (zapojení na obr. 5.18). Naměřené fázové efektivní hodnoty napětí a jejich fázové posuny (reference fázových posunů je určena blokem) jsou převedeny z polárních do kartézských souřadnic, je proveden výpočet sdružených napětí a opět jsou napětí převedena do polárních souřadnic. Sdružená napětí jsou dále upravena výpočtem průměrné, maximální a minimální hodnoty (obr. 5.19 a 5.20).

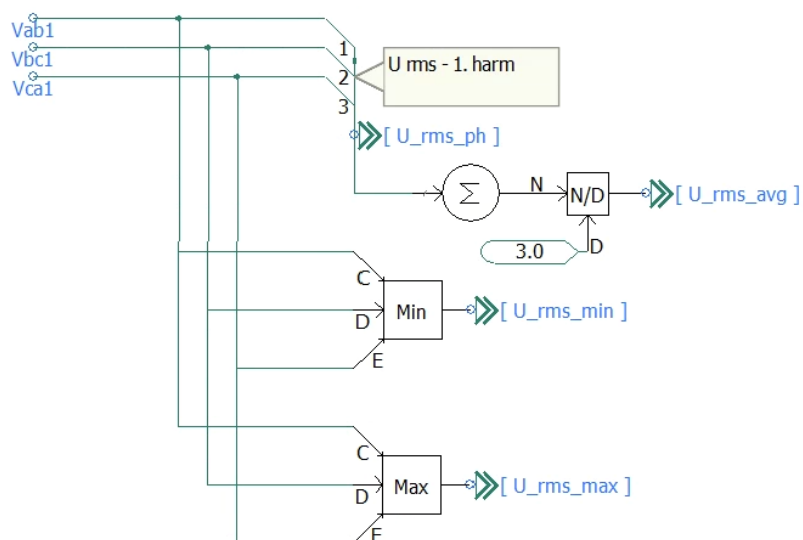
Nastavení bloku FFT pro měření napětí je shodné s nastavením pro měření proudu a lze nalézt na obr. 5.17.



Obr. 5.18: Zapojení bloku FFT pro měření napětí



Obr. 5.19: Výpočet sdružených napětí



Obr. 5.20: Výpočet průměrných, minimálních a maximálních hodnot

#### 5.4.4 Výpočet výkonu

Pro potřeby řízení i vyhodnocení je potřebné měřit 2 typy výkonu: činný a jalový. Opět jsou uvažována zjednodušená definovaná na počátku 5.4.

Činný výkon lze podle [32] definovat jako výkon, který je použit na vykonání práce (tedy energie) v obvodu. V obvodu s pouze rezistivní zátěží je  $\cos \varphi = 1$  a vlna napětí je tedy ve fázi s proudem. Lze jej vypočítat dle rovnice (5.3).

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (5.3)$$

V případě, že se v obvodu nachází mimo rezistivní zátěže ještě kapacitní nebo induktivní zátěže, lze jako další výkon definovat výkon jalový. Energie, kterou jalový výkon reprezentuje se nespotřebuje na práci, ale je uložena v elektrickém či magnetickém poli a přelévá se periodicky mezi zdrojem a odběrem bez spotřebování. Lze jej také vypočítat pomocí rovnice (5.4).

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad [\text{var}; \text{V}, \text{A}, -] \quad (5.4)$$

Při tvorbě modelu byly uvažovány možnosti měření výkonu:

1. výpočtem pomocí efektivních hodnot  $U$  a  $I$  měřeným FFT,
2. výpočtem  $p(t)$ ,  $q(t)$ :
  - (a) výpočet  $p(t)$  a  $Q$ ,
  - (b) využití DQ0 transformace.

#### Výpočet pomocí hodnot z FFT

Nejjednodušší možností měření výkonu (mimo využití přímo určených měřičů z knihovny bloků) by bylo měření pomocí již využívaných bloků FFT (měření proudu a napětí). Blok FFT disponuje rovněž výstupem fázového úhlu. Ale při aktivované funkci „frequency tracking“ se dle [30] reference použitá pro měření fázového úhlu může změnit. Což v důsledku způsobí nesoulad referencí fázových posunů proudu a napětí, tedy nepoužitelný výsledek dle rovnic (5.5a) a (5.5b).

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I) \quad [\text{W}; \text{V}, \text{A}, ^\circ, ^\circ] \quad (5.5a)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I) \quad [\text{var}; \text{V}, \text{A}, ^\circ, ^\circ] \quad (5.5b)$$

kde:  $U$  ... sdružená hodnota napětí

$I$  ... sdružená hodnota proudu

$\varphi_U$  ... fázový posun napětí

$\varphi_I$  ... fázový posun proudu

## Výpočet $p(t)$ a $Q$

Pro měření činného výkonu s využitím teorie okamžitých výkonů dle této kapitoly je nutné využít možností vyplývajících ze zjednodušení definovaných na počátku kapitoly 5.4. Za činný výkon bude rovněž považován jen výkon v sousledné složce v symetrické síti. Dle [34] lze 3f okamžitý výkon napsat jako součet okamžitých výkonů v každé fázi dle rovnice (5.6). Z ní lze po substituci psát rovnici (5.7).

$$p_{3f}(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) \quad (5.6)$$

kde:  $a, b, c$  ... označení fáze

$$P_{3f} = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cos(\varphi_U - \varphi_I) = p_{3f}(t) \quad (5.7)$$

kde:  $P_{3f}$  ... sdružený výkon

$U_f$  ... fázové napětí

$I_f$  ... fázový proud

Pro výpočet  $Q$  lze z napětí a proudu změřených dle předešlých kapitol vypočítat zdánlivý výkon  $S$ , využít pravidlo trojúhelníku a psát:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_f \quad (5.8)$$

$$Q_{3f} = \sqrt{S^2 - P_{3f}^2} \quad (5.9)$$

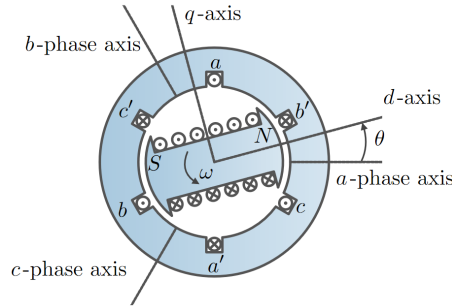
Při ověřování bylo ale zjištěno, že  $Q$  zjištěný metodou popsanou v této kapitole je pro model popisovaný v této práci chybný a nebyla nalezena chyba při sestavování měřicího výpočtu. Přesnost výpočtu byla ověřena sestavením modelu jednoduchého modelu trojfázového obvodu se známými parametry činného odporu a reaktance. Měřený výkon byl porovnán s výkony měřenými pomocí dalších bloků z knihovny bloků (Multimeter, Real/Reactive Power Meter) a s výkony vypočtenými. Další nevýhodou tohoto systému měření je nutnost vnímat změny frekvence v síti z důvodu použitých bloků FFT a jejich snížené přesnosti v okamžiku změny frekvence sítě a před ustálením frekvence první harmonické.

## Výpočet s využitím dq0 transformace

Teorie okamžitých výkonů  $p-q$  je založena na převodu napětí a proudů ze složek abc do  $\alpha\beta 0$ , tedy (Clarkové transformace) dle [34]. PSCAD tento blok nenabízí, nabízí ale možnost převodu signálů ze složek abc do dq0 (Clarkové-Parkova transformace).

Transformace dle Clarkové převádí 3f systém do 2 kolmých složek (a nulové složky, kterou lze v symetrické soustavě zanedbat), jejichž velikost se v čase mění, ale směr ne. Tyto složky lze vypočítat dle rovnice (5.10) (pro proud lze použít analogického výpočtu).

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5.10)$$



Obr. 5.21: Ilustrace převodu ze složek abc do dq0

Parkova transformace řeší problém s měnění se velikostí složek v čase tak, že osy d a q se otáčejí synchronně s fázorem napětí nebo proudu dle obr. 5.21. Kombinací Parkovy a Clarkové transformace je možné získat rovnici (5.11), který je ve výkonově invariantní formě. V bloku dq0 transformace v knihovně bloků je využita výkonově variantní forma dle rovnice (5.12). Toto ale znamená, že složky proudu i složky napětí jsou  $\sqrt{\frac{2}{3}} \times$  větší než při výpočtu pomocí rovnice (5.11) (která po transformaci zachovává velikosti výkonů) a toto je nutné zohlednit. Pro referenci úhlu  $\vartheta$  je využit výstup bloku PLL využitého pro měření frekvence, jak je vidět na obr. 5.24 a 5.18.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos (\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \vartheta & -\sin (\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin (\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

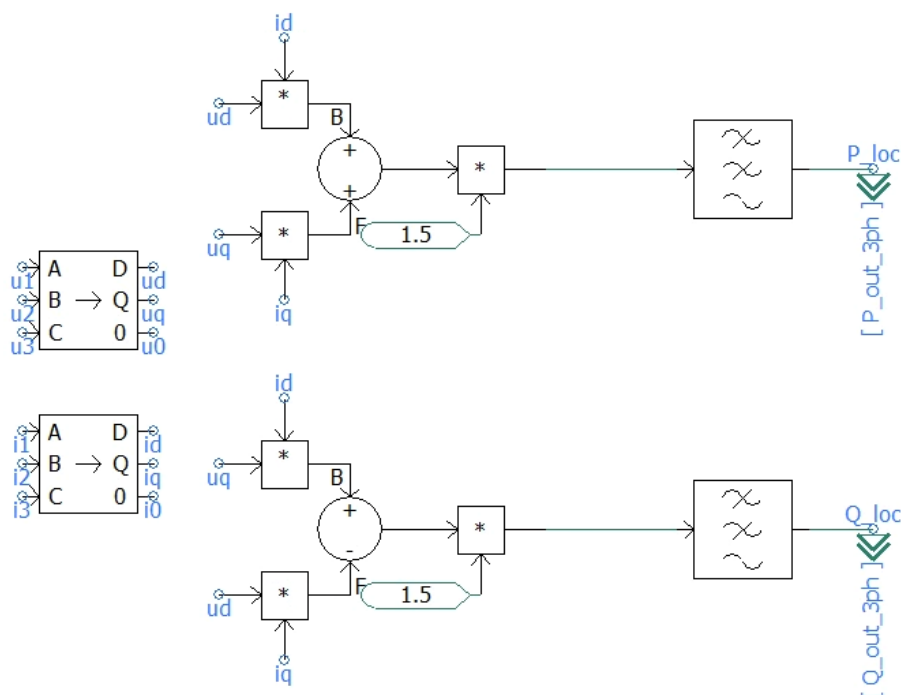
$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \cos (\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & \cos (\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \vartheta & -\sin (\vartheta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin (\vartheta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Výpočet činného  $p(t)$  a jalového  $q(t)$  vychází z [35] pro výkonově variantní formu se zanedbáním nulové složky:

$$p(t) = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (5.13)$$

$$q(t) = \frac{3}{2}(u_q i_d - u_d i_q) \quad (5.14)$$

Z ověření vyplynulo, že tato metoda je vhodná a je použita v modelu. Zapojení výpočtu je na obr. 5.22, před výstupem je signál  $P$  i  $Q$  filtrován dolnoproústým filtrem s nastavením dle obr. 5.23. Nastavení bloku dq0 transformace je na obr. 5.24.

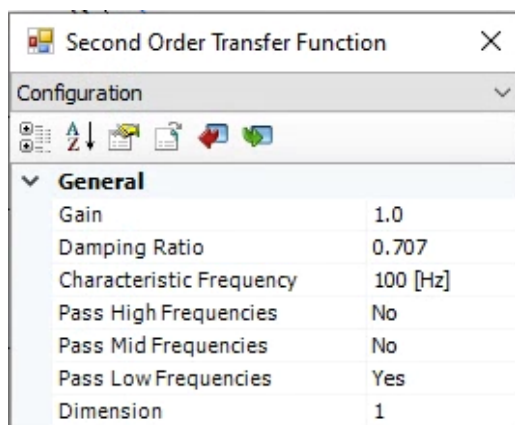


Obr. 5.22: Výpočet  $p(t)$  a  $q(t)$  v modelu

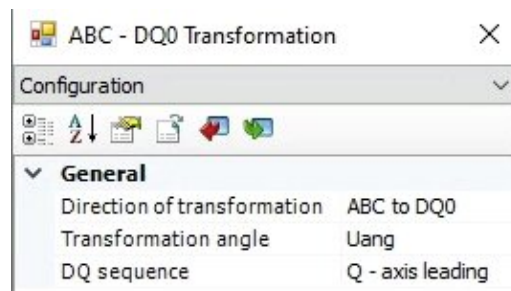
### Výpočet $\cos \varphi$

Výpočet  $\cos \varphi$  je dle rovnice (5.15). hodnota  $\text{sign}(Q)$  je do výpočtu přidána pro možnost rozlišení dodávky nebo odběru jalového výkonu přímo z hodnoty účinníku, který obvykle nabývá jen kladné hodnoty. Další funkcí v řetězci výpočtu je komparátor, který řeší oscilaci hodnoty mezi 1 a -1 při nízkém jalovém výkonu. Řetězec výpočtu je na obr. 5.25.

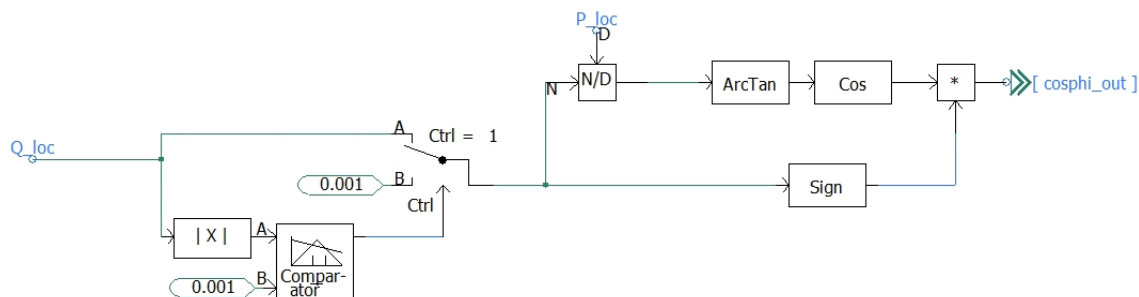
$$\cos \varphi = \text{sign}(Q) \cdot \cos \left( \arctg \frac{P}{Q} \right) \quad [-; \text{var}, W, \text{var}] \quad (5.15)$$



Obr. 5.23: Nastavení dolnoprostupného filtru



Obr. 5.24: Nastavení bloku dq0 transformace



Obr. 5.25: Výpočet  $\cos \varphi$

## 5.5 Blok inicializace a ochran a ROCOF ochranná funkce

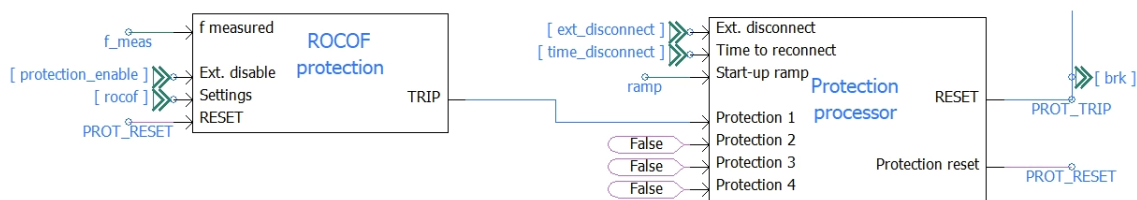
Na začátku simulace nebo při deaktivaci výrobní z externího povelu nebo povelu ochranné funkce je nutné všechny bloky simulace, které mají schopnost paměti mezi kroky, resetovat na výchozí hodnotu. K tomuto účelu byl vytvořen modul „Protection processor“ (obr 5.26) mající za úkol zpracovat signály ochranných funkcí a inicializovat ostatní bloky v simulaci.

Jedninou ochrannou funkcí využitou v modelu popsaném v této práci je ochrana před velkým nárůstem frekvence. Pro její účel byl vytvořen blok „ROCOF protection“ (obr. 5.26).

### 5.5.1 Protection processor

Porty modulu jsou charakterizovány v tab. 5.3. Základními bloky funkce zpracování povelu deaktivace výrobní jsou bloky zpoždění „Binary delay“ a logická funkce





Obr. 5.26: Moduly „Protection processor“ a „ROCOF protection“

„OR“. Funkce „OR“ zpracovává signály pro vypnutí z portů „Protection 1–4“ a „Ext. disconnect“ (pro vybavení je nutné aktivovat pouze 1 z nich). Nastavení zpoždění je na obr. 5.29.

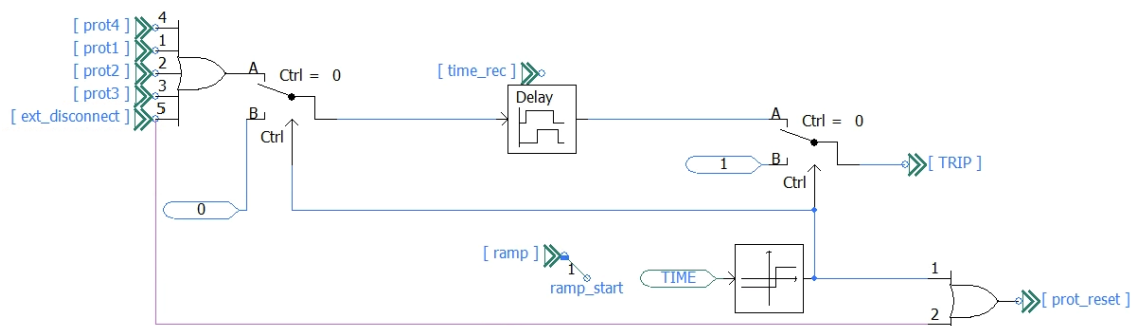
Pro inicializaci jsou důležité 2 přepínače, které zabraňují fungování bloku zpoždění před inicializací v případě, že by některý z povelů pro deaktivaci byl aktivní při inicializaci. Přepínače jsou ovládány blokem „Single Input Level Comparator“, jehož nastavení je na obr. 5.28.

RESET (signál „TRIP“) je použit pro resetování řídicích bloků a pro otevření vypínače (obr. 5.1).

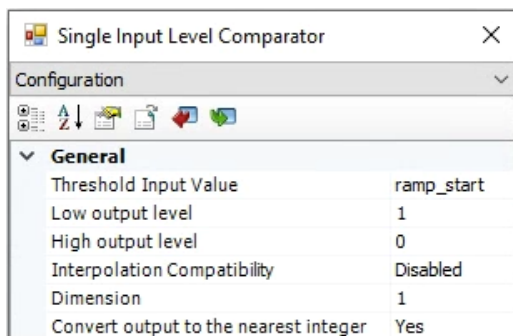
Alternativní RESET (signál „prot\_reset“ a port „Protection reset“) je použit pro resetování ochranné funkce pro než je signál RESET nevhodný.

Tab. 5.3: Charakteristika portů modulu „Protection processor“

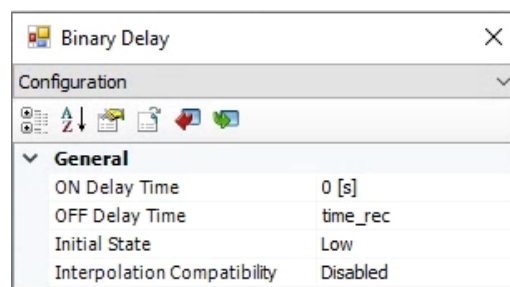
Označení	Rozměr	Popis	jedn.
Ext. disconnect	1	povel k deaktivaci dle kap. 5.2	-
Time to reconnect	1	zpoždění znovupřipojení dle kap. 5.1	s
Start-up ramp	2	inicializační čas; strmost nárůstu výkonu dle kap. 5.1	p.u./s; s
Protection 1–4	1	bin. hodnota stavu ochrany (0 ... OK; 1 ... VYBAV.)	-
RESET	1	výstupní sig. pro RESET (0 ... OK, 1 ... RESET)	-
Protection reset	1	alternativní RESET (1 ... OK, 0 ... RESET)	-



Obr. 5.27: Řetězec výpočtu modulu „Protection processor“



Obr. 5.28: Nastavení bloku inicializačního signálu



Obr. 5.29: Nastavení bloku zpoždění před připojením

## 5.5.2 ROCOF protection

Ochrana ROCOF spočívá v měření rychlosti nárůstu frekvence po dobu měřicího okna a následné případné odpojení výroby od sítě. Blok derivace dostupný z knihovny bloků je ale při používání velmi zarušen dle [30]. Pro odrušení a průměrování po stanovené okno je využit blok přenosové funkce. Tato má charakteristiku dle rovnice (5.16). Časová konstanta bloku derivace je nastavená na hodnotu 1 s, časová konstanta přenosové funkce je délka průměrovacího okna „window\_time“.

$$y(t) = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})u(t) \quad [[u]; [t], [t], [u]] \quad (5.16)$$

kde:  $y(t)$  ... výstupní signál

$u(t)$  ... vstupní signál

$t$  ... čas

$\tau$  ... časová konstanta

Protože samotné nastavení časové konstanty je pro průměrování s využitím přenosové funkce prvního řádu nevhodné, bylo proveden výpočet výstupní hodnoty přenosové funkce v čase  $\tau$  (odpovídající oknu průměrování) při jednotkovém skoku vstupního signálu  $u(t)$  a odpovídající konstanta  $k$  použitá pro vynásobení výstupní hodnoty přenosové funkce:

$$y(\tau) = (1 - e^{-\frac{\tau}{T}})u(\tau)$$

$$y(\tau) = (1 - e^{-1}) \cdot 1$$

$$y(\tau) = 0,63212056$$

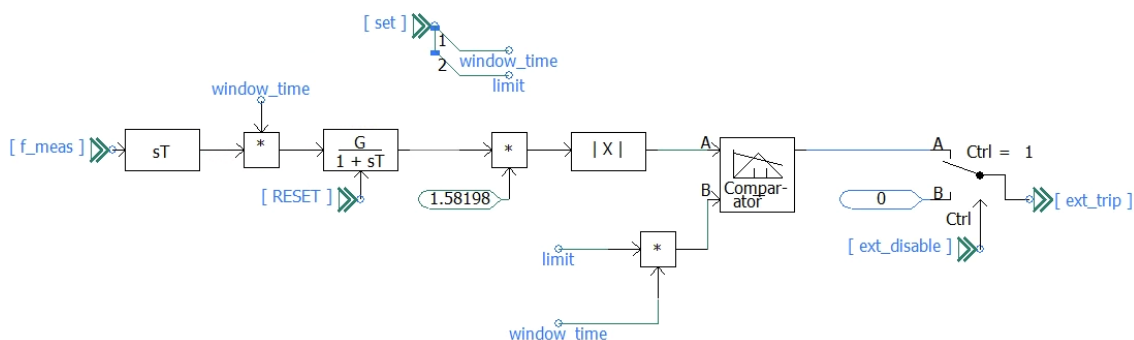
$$k = \frac{1}{y(\tau)}$$

$$k = \frac{1}{0,63212056}$$

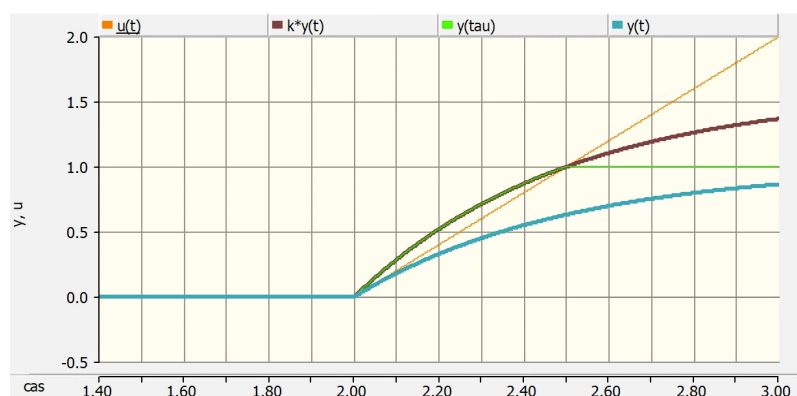
$$k = 1,5819767$$

kde:  $k$  ... konstanta pro úpravu hodnoty přenosové funkce

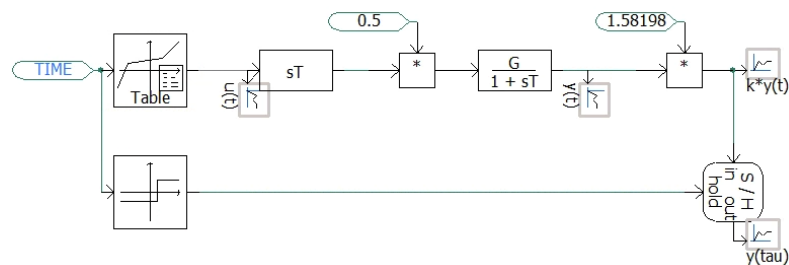
Při této hodnotě  $k$  je možné využít výpočet vyobrazený na obr. 5.30. Ilustrace chování výpočtu je na obr. 5.31 s řetězcem využitým pro toto ilustrační měření na obr. 5.32.



Obr. 5.30: Řetězec výpočtu modulu „ROCOF protection“



Obr. 5.31: Chování bloku „ROCOF protection“ při nárůstu frekvence 2 Hz/s s délkou okna 0,5 s



Obr. 5.32: Testovací výpočet pro ilustraci chování bloku ROCOF

Výstupní hodnota z přenosové funkce se po vynásobení konstantou  $k$  porovná s limitem pro dovolený nárůst a v případě, že bude nárůst vyšší než dovolený, výstupní signál bloku bude mít hodnotu „1“.

Blok v PSCADu je vyobrazen na obr. 5.26 se specifikací portů v tabulce 5.4.

Tab. 5.4: Charakteristika portů modulu „ROCOF protection“

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
f_measured	1	měřená frekvence sítě	Hz
Ext. disable	1	deaktivace funkce ROCOF (0 ... VYP, 1 ... ZAP)	-
Settings	2	délka okna; limit dle kap. 5.1	s; Hz/s
RESET	1	reset přenos. funkce (1 ... OK, 0 ... RESET)	-

## 5.6 Řízení činného výkonu

Principiální schéma řízení činného výkonu je v souhrnném blokovém schématu na obr. 5.4. Model bloku řízení činného výkonu je na obr. 5.33. Charakteristika portů bloku je v tab. 5.5.

Jak je vyobrazeno i na obr. 5.4, žádaná hodnota pro regulátor se stanoví jako minimum z žádaného napětí, výstupu funkce  $P(U)$  a výstupu funkce  $P(f)$ .

### 5.6.1 Funkce $P(U)$

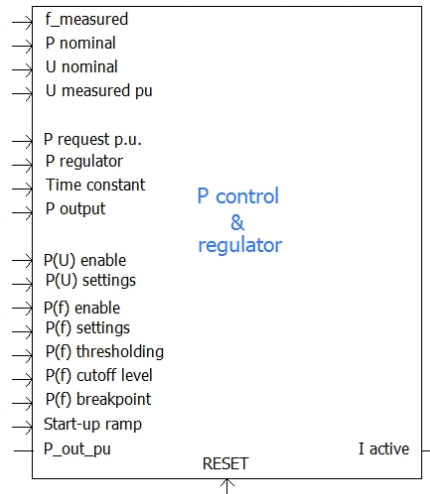
Skládá se z LUT, do níž jsou přivedeny relevantní signály popsány v tabulce 5.5, limitace  $\langle 0; 1 \rangle$  a z přepínače, který umožňuje deaktivaci funkce. Celý výpočet je na obr. 5.34.

### 5.6.2 Externě žádaná hodnota výkonu

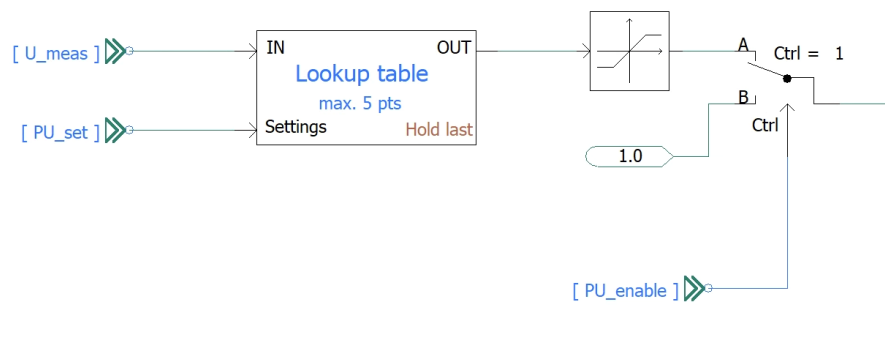
$P_{\text{žád}}$  (p.j.) je přivedena na limitaci  $\langle 0; 1 \rangle$  a dále je porovnávána blokem, který vybírá minimální hodnotu z  $P_{\text{žád}}$ ,  $P(U)$  a  $P(f)$  dle obr. 5.35.

Tab. 5.5: Charakteristika portů modulu nastavení proudu

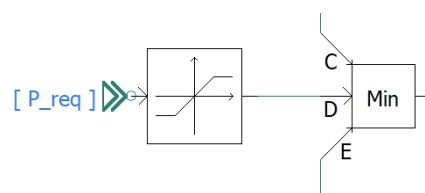
Označení	Rozměr	Popis	jedn.
f_measured	1	měřená frekvence sítě	Hz
P nominal	1	jmenovitý výkon dle kap. 5.1	MW
U nominal	1	jmenovité napětí výroby dle kap. 5.1	kV
U measured pu	1	poměrná hodnota měřeného napětí v PM	p.j.
P request pu	1	$P_{\text{žad}}$ dle kap. 5.2	p.j.
P regulator	2	proporcionální; integrační konst. dle kap. 5.1	-
Time constant	1	časová konstanta zpoždění dle kap. 5.1	s
P output	1	měřený činný výkon v PM	MW
P(U) enable	1	volba použití P(U) (1 ... ano, 0 ... ne)	-
P(U) settings	11	nastavení P(U) pro LUT dle kap. 5.3.1	-
P(f) enable	1	volba použití P(f) (1 ... ano, 0 ... ne)	-
P(f) settings	11	nastavení P(f) pro LUT dle kap. 5.3.1	-
P(f) thresholding	3	dle kap. 5.6.3	-
P(f) cutoff level	1	úroveň $U$ (p.j.) deaktivace P(f) dle kap. 5.1	p.j.
P(f) breakpoint	1	volba bodu lomu charakteristiky dle kap. 5.1 a kap. 5.6.3	-
Start-up ramp	2	inicializační čas; strmost nárůstu výkonu dle kap. 5.1	p.j./s; s
RESET	1	inicializace bloku (0 ... OK, 1 ... RESET)	-
I active	1	žádaný činný proud pro blok nastavení proudu	1
P_out_pu	1	výstup vypočítaného poměrného výkonu v PM	p.j.



Obr. 5.33: Modul řízení činného výkonu



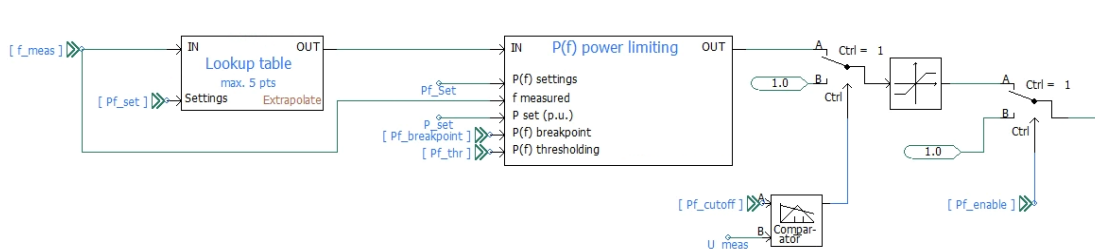
Obr. 5.34: Řetězec výpočtu funkce  $P(U)$



Obr. 5.35: Řetězec žádané hodnoty výkonu

### 5.6.3 Funkce $P(f)$

Skládá se z LUT, do níž jsou přivedeny relevantní signály popsané v tabulce 5.5, funkce omezování maximálního výkonu při zvýšení frekvence („ $P(f)$  power limiting“), přepínače deaktivace funkce při podpětí v PM, limitace  $\langle 0; 1 \rangle$  a z přepínače, který umožňuje deaktivaci funkce. Celý výpočet je na obr. 5.36.



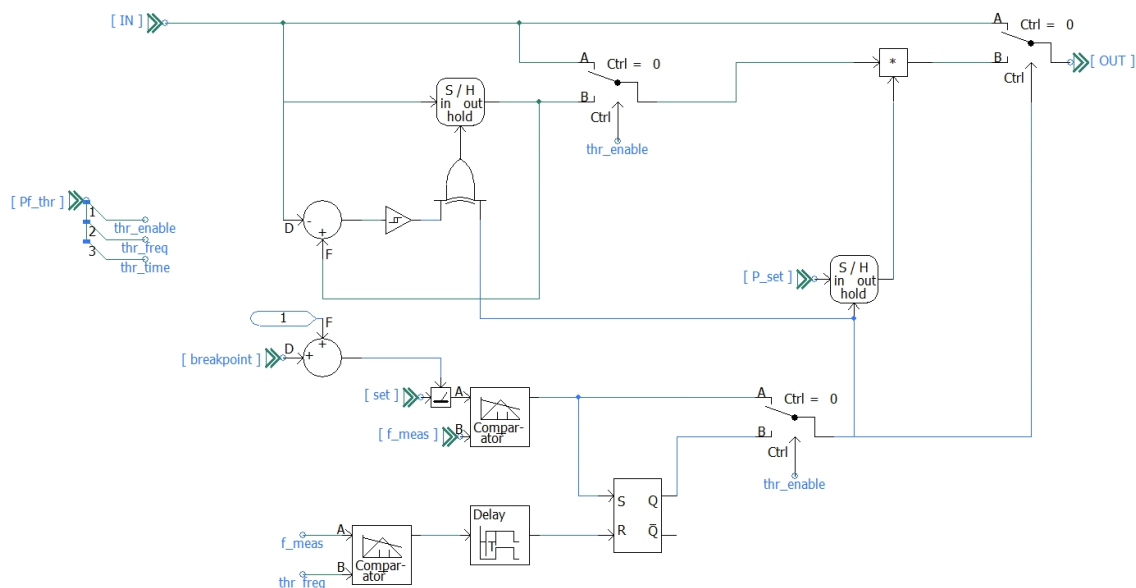
Obr. 5.36: Řetězec výpočtu funkce  $P(f)$

#### Blok $P(f)$ power limiting

Blok je vyobrazen na obr. 5.36, charakteristika portů je v tab. 5.6.

V případě, že je zakázána funkce „thresholding“ v parametrech modulu (kap. 5.1), blok Sample and Holds (SaH) bude aktivován při vzrůstu frekvence nad hodnotu bodu lomu charakteristiky. Za referenční hodnotu bude do poklesu frekvence považován výkon na výstupu v době vzrůstu frekvence nad hodnotu lomu. Blok SaH bude deaktivován při poklesu pod frekvenci lomu a za referenční (a maximální hodnotu) výkonu bude opět považována hodnota 1 p.j.

Pokud bude aktivována funkce „thresholding“, deaktivace bloku SaH bude pozná až pokud frekvence poklesne minimálně na čas  $f_{stop}$  pod frekvence  $f_{stop}$ . Další funkcí je prevence nárůstu výkonu při zvýšené frekvenci (blok SaH na levé straně obr. 5.37) – v případě nárůstu frekvence (a tedy rozdílu hodnoty do bloku z LUT a aktuálního nastaveného výkonu za blokem SaH) většího než horní limit hystereze (z důvodu numerických oscilací výkonu výroby nastavena na hodnotu 0,005) dojde k deaktivaci levého SaH do doby než je tento rozdíl menší než spodní limit hystereze (0,001) a poté opět dojde k držení hodnoty. V takovém případě nedojde k nárůstu hodnoty na výstupu funkce  $P(f)$  do splnění podmínek nebo do poklesu napětí pod deaktivací hranici celé funkce  $P(f)$ .



Obr. 5.37: Řetězec výpočtu pro blok  $P(f)$  power limiting

Tab. 5.6: Charakteristika portů modulu  $P(f)$  power limiting

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
f measured	1	měřená frekvence sítě	Hz
P set (p.u.)	1	poměrná hodnota měřeného výkonu v PM	p.j.
P(f) settings	11	nastavení P(f) pro LUT dle kap. 5.3.1	-
P(f) breakpoint	1	bod na ose X, kde se láme charakteristika P(f), nad touto frekvencí bude limitován výkon	-
P(f) thresholding	3	povolení thresholdingu (1 ... ANO, 2 ... NE); $f_{stop}$ ; $t_{stop}$	-;Hz;s

#### 5.6.4 Regulátor činného výkonu

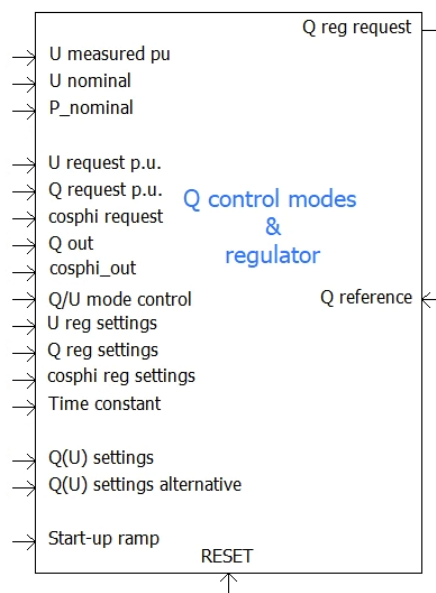
Pro regulaci je využit PI regulátor s antiwindup řešením z kap. 5.3.3 a limitací nárůstu z kap. 5.3.2. Po výstupu z regulátoru je akční hodnota limitována na interval  $\langle 0; 1,15 \rangle$  (vyšší limit je z důvodu výkonové rezervy). Následně je žádaná činná složka proudu vypočtena dle rovnice (5.17).

$$I_{\check{c}} = \frac{P_{reg} \cdot P_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad [\text{kA; p.j., MW, kV}] \quad (5.17)$$

kde:  $P_{reg}$  ... akční zásah regulátoru po limitaci



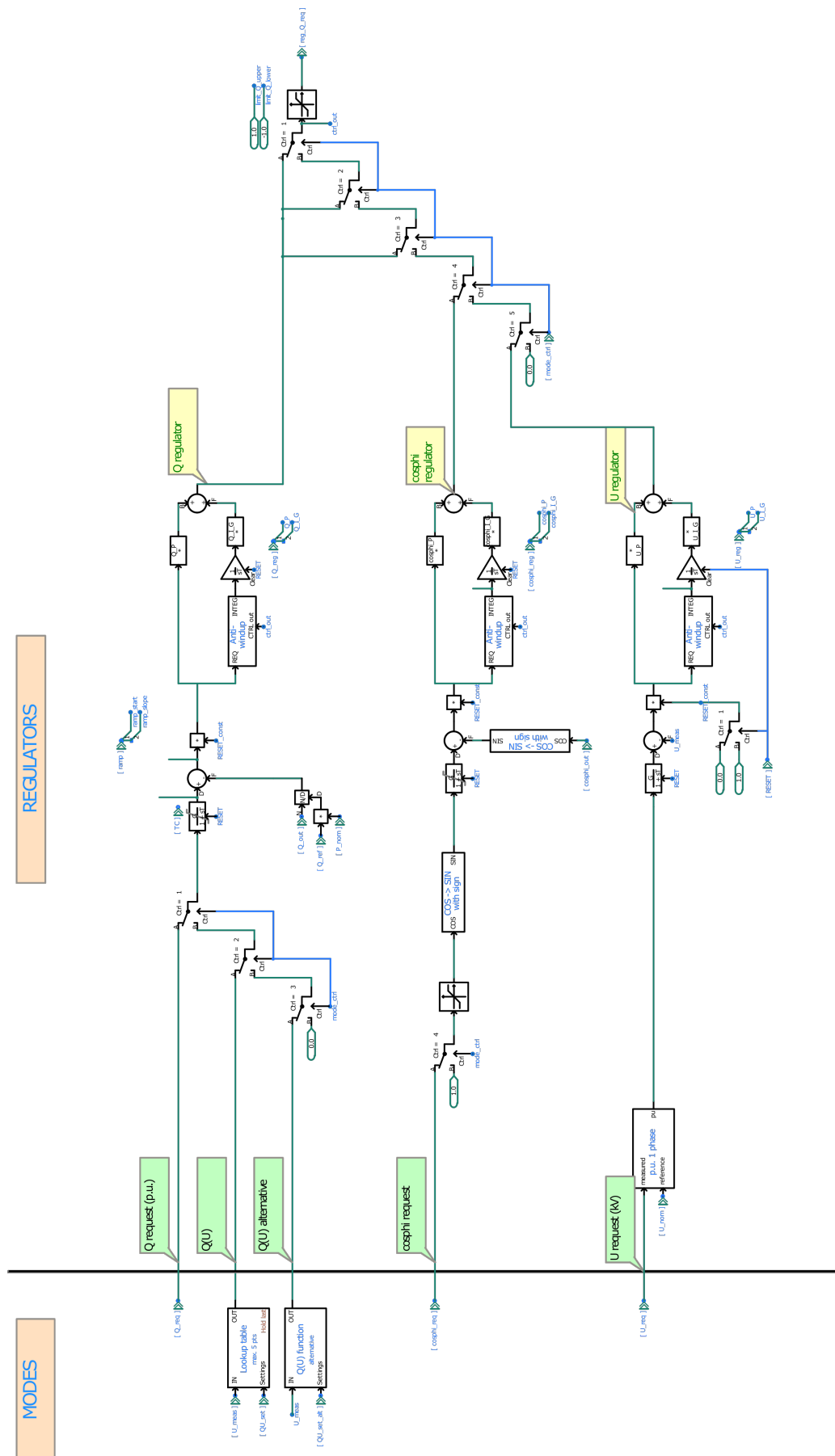




Obr. 5.39: Modul řízení jalového výkonu

Tab. 5.7: Charakteristika portů modulu řízení jalového výkonu

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
U measured pu	1	poměrná hodnota měřeného napětí v PM	p.j.
P_ nominal	1	jmenovitý výkon dle kap. 5.1	MW
U nominal	1	jmenovité napětí výroby dle kap. 5.1	kV
U request p.u.	1	$U_{\text{žad}}$ dle kap. 5.2	p.j.
Q request p.u.	1	žádaný jalový výkon dle kap. 5.2	p.j.
cosphi request	1	žádaný $\cos \varphi$ dle kap. 5.2	-
Q out	1	měřený jalový výkon výroby v PM	Mvar
cosphi_out	1	měřený $\cos \varphi$ výroby v PM	-
Q/U mode control	1	volba módu řízení dle kap. 5.2	-
U reg settings	2	proporcionální; integrační konst. reg. $U$ dle kap. 5.1	-
Q reg settings	2	proporcionální; integrační konst. reg. $Q$ dle kap. 5.1	-
cosphi reg settings	2	proporcionální; integrační konst. reg. $\cos \varphi$ dle kap. 5.1	-
Time constant	1	časová konstanta zpoždění žád. hodn. dle kap. 5.1	s
Q(U) settings	11	nastavení Q(U) pro LUT dle kap. 5.3.1	-
Q(U) settings alter.	8	alternativní nastavení Q(U) dle kap. 5.7.1	-
Start-up ramp	2	inicializační čas; strmost nárůstu výkonu dle kap. 5.1	p.j./s; s
RESET	1	inicializace bloku (0 ... OK, 1 ... RESET)	-
Q reference	1	reference jalového výkonu pro regulátor	p.j.
Q reg request	1	akční zásah regulátoru pro nastavení požadovaného $Q$	p.j.



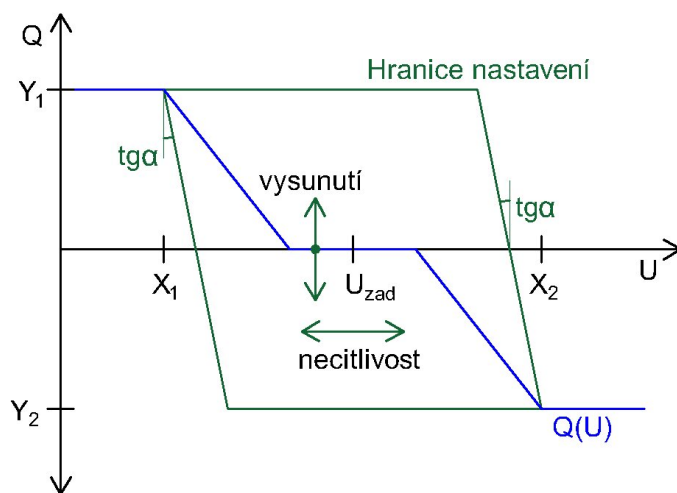
Obr. 5.40: Zapojení bloku řízení jalového výkonu

### 5.7.1 $Q(U)$ alternativní zadání

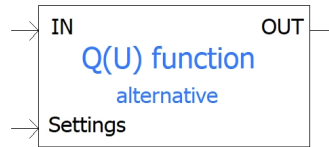
Pro potřeby simulace byl vytvořen alternativní blok k LUT pro zadávání  $Q(U)$  charakteristiky. Modul je na obr. 5.42, charakteristika portu „Settings“ v tab. 5.8 a skript v příloze D. Příklad charakteristiky s vyznačenými možnostmi změny je na obr. 5.41.

Tab. 5.8: Charakteristika signálu pro port „Settings“ modulu  $Q(U)$  alternativního zadávání

Pořadí	Popis
1	$X_1$
2	$Y_1$
3	$X_2$
4	$Y_2$
5	žádané napětí $U_{\text{žád}}$ (p.j.)
6	necitlivost (p.j.)
7	vysunutí v ose Y (p.j.)
8	omezovací strmost $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta X}{\Delta Y}$



Obr. 5.41: Příklad alternativního zadání  $Q(U)$

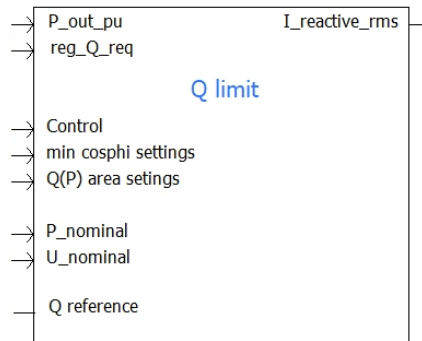


Obr. 5.42: Modul alternativního zadání  $Q(U)$

## 5.8 Limitace jalového výkonu

Model v PSCADu je na obr. 5.43 a charakteristika portů v tab. 5.9. Jak je naznačeno v kap. 5.2, v modelu jsou implementovány 3 možnosti limitace:

1. bez limitu,
2. limitace symetrickou charakteristikou do „V“ – tedy minimálním účíníkem,
3. limitace parametrizovatelnou (až 10 body, i nesymetricky)  $Q(P)$  oblastí.



Obr. 5.43: Modul limitace jalového výkonu

Tab. 5.9: Charakteristika portů modulu limitace jalového výkonu

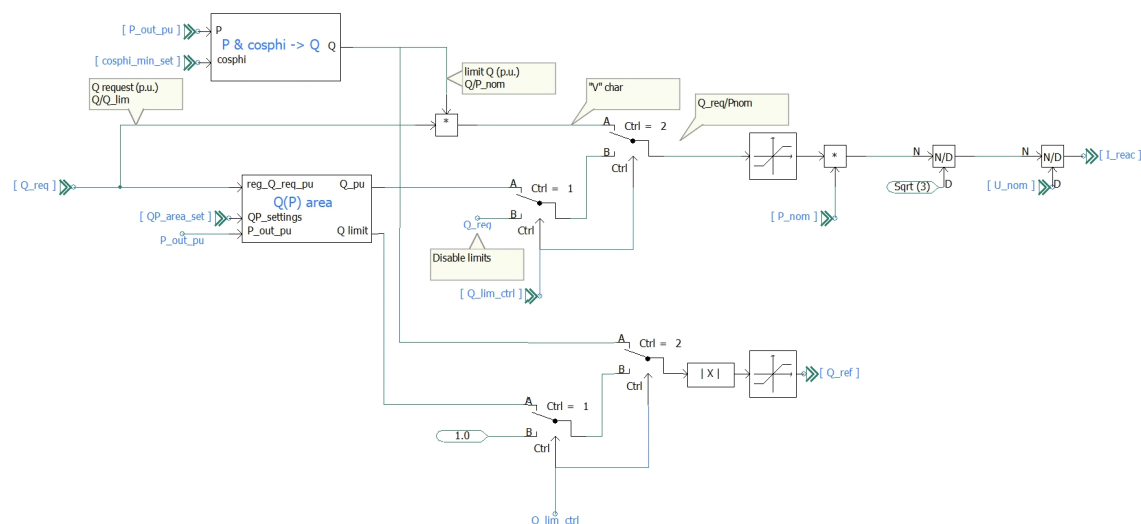
Označení	Rozměr	Popis	jedn.
P_out_pu	1	poměrný výkon v v PM	p.j.
reg_Q_req	1	$Q_{\text{žad}}$	p.j.
Control	1	volba limitace dle 5.2	-
min cosphi settings	1	min. účíník pro „V“ char. dle kap. 5.1	kV
Q(P) area settings	31	hodnoty nastavení $Q(P)$ dle kap. 5.8.2	-
P nominal	1	jmenovitý výkon dle kap. 5.1	MW
U nominal	1	jmenovité napětí výroby dle kap. 5.1	kV
Q reference	1	výstup reference $Q_{\text{max}}$ pro regulátor $Q$	p.j.
I_reactive_rms	1	žádaný jalový proud pro blok nastavení proudu	1

Další funkcí je výpočet reference  $Q_{\text{max}}$  pro regulátor jalového výkonu v bloku řízení  $Q$  v kap. 5.7; používá se  $|Q_{\text{max}}|$  (absolutní hodnota z důvodu, že  $Q_{\text{max}}$  může

nabývat i záporné hodnoty) limitovaná na  $\langle 0; 1 \rangle$ . Konečný výpočet žádané jalové složky proudu je dle rov. (5.19).

$$I_j = \frac{Q_{zad} \cdot P_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad [\text{kA}; \text{p.j.}, \text{MW}, \text{kV}] \quad (5.19)$$

kde:  $Q_{zad}$  ... žádaná hodnota jalového výkonu po limitaci



Obr. 5.44: Zapojení bloku limitace jalového výkonu

### 5.8.1 Charakteristika do „V“

Blok „P & cosphi -> Q“ na obr. 5.44 provádí výpočet dle rov. (5.20).  $Q_{max}$  se dále vynásobí s žádanou hodnotou jalového výkonu z vstupu bloku.

$$Q_{max} = \text{tg} [\arccos (\cos \varphi)] \cdot P \quad [\text{p.j.}; -, \text{p.j.}] \quad (5.20)$$

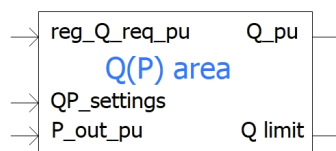
kde:  $\cos \varphi$  ... minimální hodnota účinníku nastavená v parametrizaci modulu výroby

$P$  ... aktuální poměrná hodnota výkonu z výroby v PM

### 5.8.2 $Q(P)$ oblast

Skript modulu je vypsán v příloze C. Modul je vyobrazen na obr. 5.45 s charakteristikou portů v tab. 5.10.

Výpočet  $Q_{max}$  a  $Q_{žad}$  po výběru oblasti pro dodávku nebo odběr (podle znaménka na portu „reg\_Q\_req\_pu“) dle obr. 5.46:



Obr. 5.45: Modul nastavení  $Q(P)$  oblasti

Tab. 5.10: Charakteristika portů modulu limitace jalového výkonu

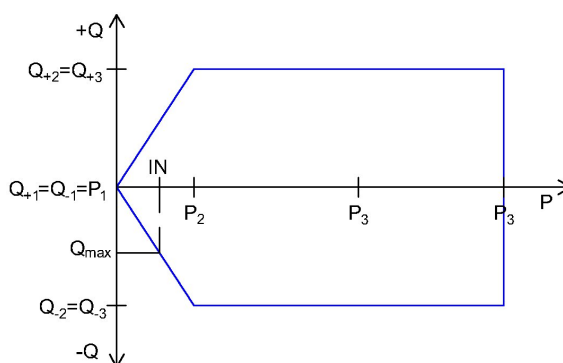
Označení	Rozměr	Popis	jedn.
$Q\_pu$	1	poměrný nastavovaný jalový výkon	p.j.
$reg\_Q\_req\_pu$	1	$Q_{\text{žad}}$	p.j.
$Q(P) \text{ area settigs}$	31	hodnoty nastavení $Q(P)$ dle tab. 5.11	-
$Q \text{ limit}$	1	výstup reference $Q_{\text{max}}$ pro regulátor $Q$	p.j.

$$Q_{\text{max}} = Q_{n-1} + \frac{Q_n - Q_{n-1}}{P_n - P_{n-1}} \cdot (IN - P_{n-1}) \quad (5.21)$$

kde:  $n$  ... pořadí nejbližšího prvku, který splňuje  $P_n \geq IN$ ,  
 $IN$  ... hodnota na portu  $P\_out\_pu$ .

$$Q_{\text{žad}} = Q_{\text{max}} \cdot Q_{\text{reg}} \quad [(p.j.); (p.j.), (p.j.)] \quad (5.22)$$

kde:  $Q_{\text{žad}}$  ... žádaná hodnota  $Q$ , z níž bude určen  $I_j$ ,  
 $Q_{\text{reg}}$  ... hodnota na portu „ $reg\_Q\_req\_pu$ “.



Obr. 5.46: Příklad nastavení  $Q(P)$  oblasti s 3 body charakteristiky

Tab. 5.11: Charakteristika signálu pro port „Q(P) area settigs“ modulu Q(P) area

Pořadí	Popis
1	počet bodů charakteristiky
2 – 11	$P_1 - P_{10}$ (je nutné zadávat hodnoty „P“ vzestupně)
12 – 21	$Q_{+1} - Q_{+10}$ (dodávka Q)
22 – 31	$Q_{-1} - Q_{-10}$ (odběr Q)

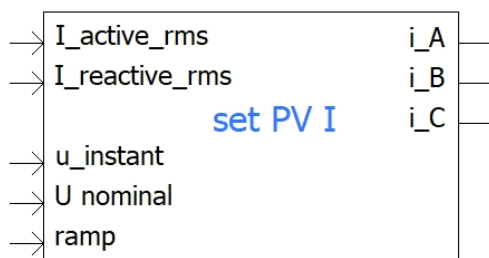
## 5.9 Nastavení proudu výroby

Vstupní a výstupní porty modulu (obr. 5.47) jsou popsány v tabulce 5.12. Z bloků řízení činného a jalového výkonu je do bloku nastavení proudu dodávána hodnota činné a jalové složky proudu. Proudové zdroje akceptují dle [30] nastavení okamžitých hodnot proudu, proto je nejdříve vypočtena amplituda (dle rov. (5.23)) a fázový posun (dle rov. (5.24)). Při inicializaci je hodnota nastaveného proudu násobena „0“. Výpočet nastavovaného proudu je na obr. 5.49.

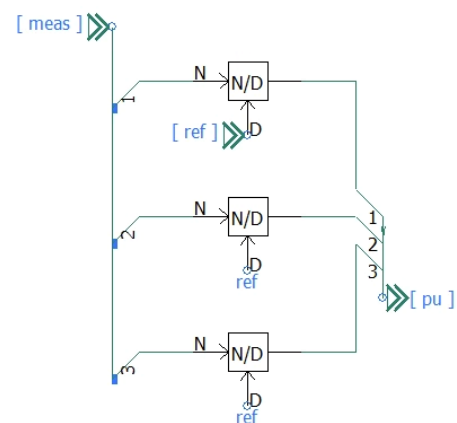
$$I_m = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \quad [\text{kA}; \text{kA}, \text{kA}] \quad (5.23)$$

kde:  $I_m$  ... amplituda proudu

$$\varphi = \arctg\left(\frac{I_j}{I_c}\right) \quad [^\circ; \text{kA}, \text{kA}] \quad (5.24)$$



Obr. 5.47: Modul nastavení proudu

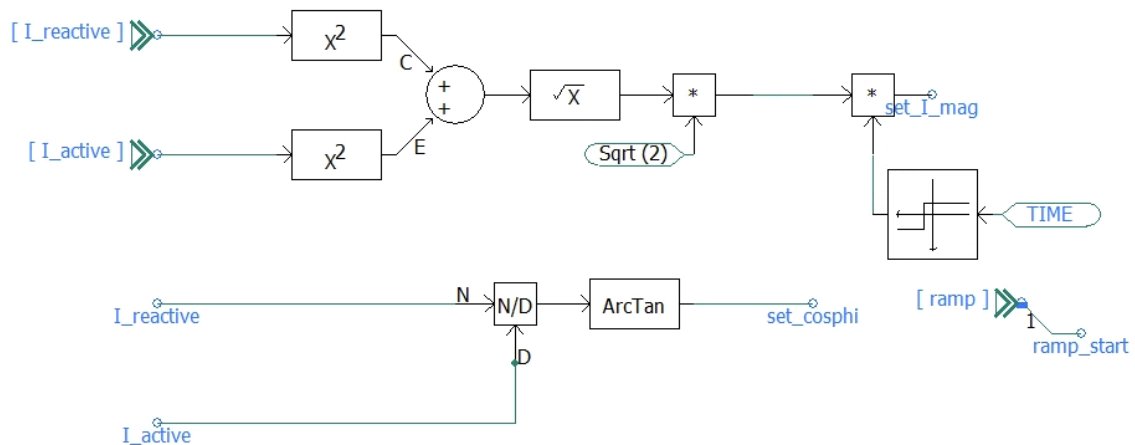


Obr. 5.48: Výpočet poměrné hodnoty 3f napětí



Tab. 5.12: Charakteristika portů modulu nastavení proudu

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
f_measured	1	měřená frekvence sítě	Hz
I_reactive_rms	1	žádaná efektivní hodnota jalové složky proudu	kA
u_instant	3	okamžité hodnoty fázových napětí	kV
U_nominal	1	jmenovité napětí výroby	kV
ramp	2	inicializační čas; strmost nárůstu výkonu dle kap. 5.1	p.j./s; s
i_(A,B,C)	1	okamžitá hodnota nast. $i$ proud. zdrojům	kA



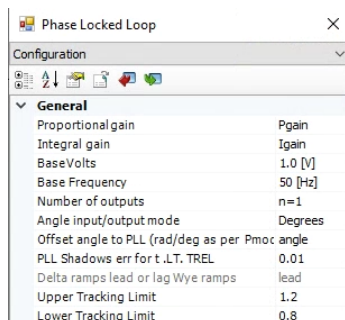
Obr. 5.49: Výpočet nastavených hodnot amplitudy proudu a fázového posuvu

Řetězec synchronizace a výpočtu okamžitých hodnot nastavovaného proudu je na obr. 5.52. Základním blokem je fázový závěs, který poskytuje referenci pro výpočet proudu (nastavení na obr. 5.50) a jehož výstupem je aktuální fáze proudu ve stupních. Další 2 fáze jsou odvozeny posunutím o  $+120^\circ$  a  $-120^\circ$ . Dále je od této aktuální fáze odečtena hodnota fázového posunu, výpočet funkce sinus a vynásobení amplitudou nastavovaného proudu.

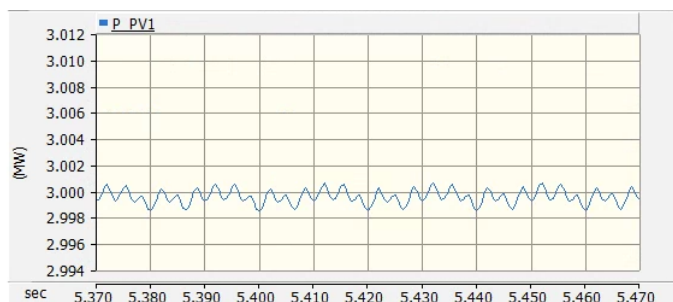
Bloku PLL je pro správnou funkci nutné nastavit některé parametry. Nejkritičtějšími jsou zesílení proporcionální a integrační složky regulátoru a opravný úhel. Zatímco pro proporcionální („Proportional gain“) a integrační („Integral gain“) zesílení je možné ponechat výchozí hodnoty, opravný úhel („angle error“) je nutné nastavit správně, jinak nebude řízení jalového ani činného výkonu správné. Pro nastavení úhlu byla výroba parametrizována na řízení na zadaný  $\cos \varphi = 1$  se zadaným opravným úhlem  $0^\circ$ . Při takto nastaveném řízení musel regulátor zasáhnout a pro skutečný účinník na výstupu  $\cos \varphi = 1$  byla žádaná hodnota fázového posunu (signál „set\_cosphi“)  $-9,2^\circ$ . Tato chyba byla poté zadána do chyby PLL dle obr. 5.52. Po zadání chyby byl žádaný fázový posun pro  $\cos \varphi = 1$  méně než  $0,1^\circ$ .

Problém s použitím PLL spočívá i ve faktu, že jeho součástí je regulátor. Tento

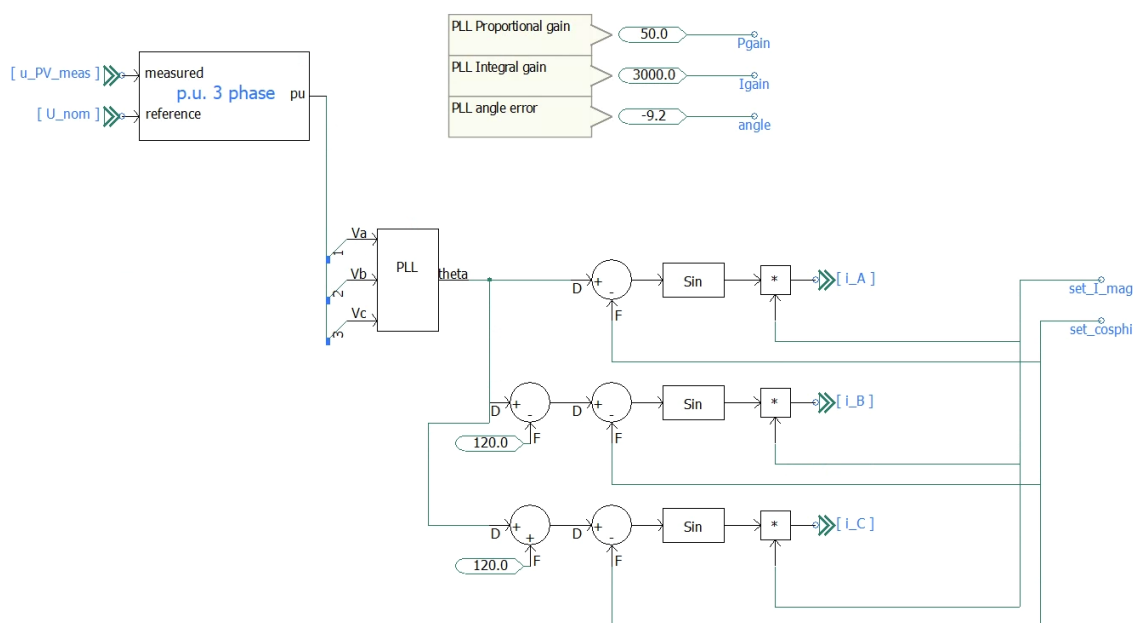
regulátor (převážně jeho proporcionální složka) zanáší do simulace malé oscilace jalového i činného výkonu (na obr. 5.51), které jsou ale vzhledem k jejich velikosti zanedbatelné.



Obr. 5.50: Parametry PLL



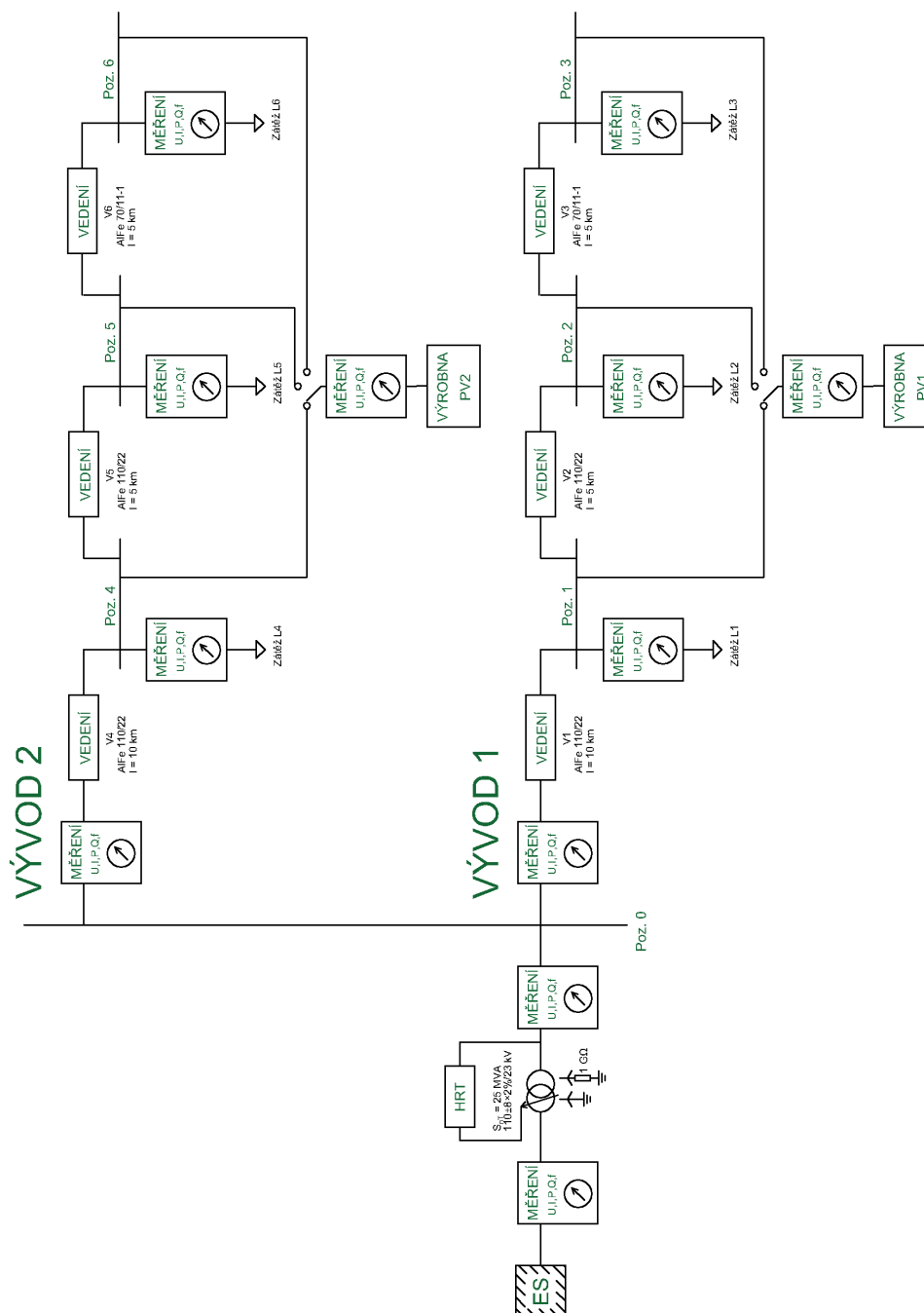
Obr. 5.51: Oscilace  $P$  při nastaveném  $P_{max} = 3 \text{ MW}$



Obr. 5.52: Synchronizace nastavovaného proudu s napětím v síti

## 6 Sestavení numerického modelu realistické testovací VN sítě se zdroji

Na základě rozboru v kap. 1.1 byla pro simulace vytvořena síť napájená z hladiny 110 kV tvořená 2 vývody dle obr. 6.1. Kompletní přehledové schéma je v příloze E.



Obr. 6.1: Blokové schéma testovací VN sítě

Model v PSCADu je rovněž přiložen v elektronické příloze (dle př. F) práce

včetně souborů využitých pro zadání parametrů simulací.

## 6.1 Napáječ ze sítě 110 kV

Model je tvořen 3f uzemněným parametrizovatelným zdrojem, jemuž je zadávána amplituda fázové hodnoty napětí a frekvence dle obr. 6.3. Model je na obr. 6.2 s charakteristikou portů v tabulce 6.1. Výpočet impedance probíhá dle rovnic (6.1c) a (6.1b).

$$Z = \frac{U^2}{S} \quad [\Omega; \text{kV}, \text{MVA}, -] \quad (6.1a)$$

$$X = \sqrt{\frac{Z^2}{1 + \left(\frac{R}{X}\right)^2}} \quad [\Omega; \Omega, -] \quad (6.1b)$$

$$R = \sqrt{Z^2 - X^2} \quad [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (6.1c)$$

kde:  $U$  ... sdružená hodnota napětí sítě

$S$  ... zkratový výkon

$Z$  ... impedance

$R$  ... činný odpor

$x$  ... reaktance

Tab. 6.1: Charakteristika portů modulu napáječe

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
V (kV)	1	sdružené napětí soustavy	kV
f (Hz)	1	frekvence sítě	Hz
S (MVA)	1	zkratový výkon	MVA
R/X	1	poměr odporu a reaktance impedance napáječe	-

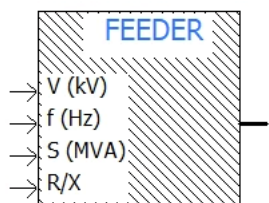
### 6.1.1 Parametrizace pro simulace ustáleného chodu

Napětí v soustavě je při simulaci UCH nastaveno dle [15]:  $U_{grid} = 117\text{kV}$ .

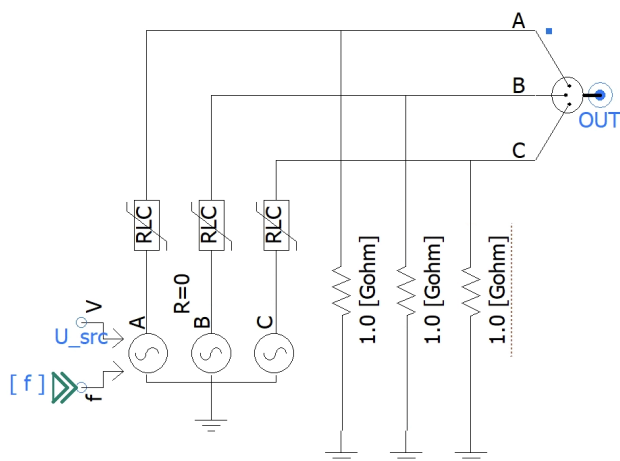
Frekvence je při simulaci považována za stálou a jmenovitou:  $f_{grid} = 50\text{Hz}$ .

Zkratový výkon je dle kap. 1.2:  $S_{grid} = 3500\text{MVA}$ .

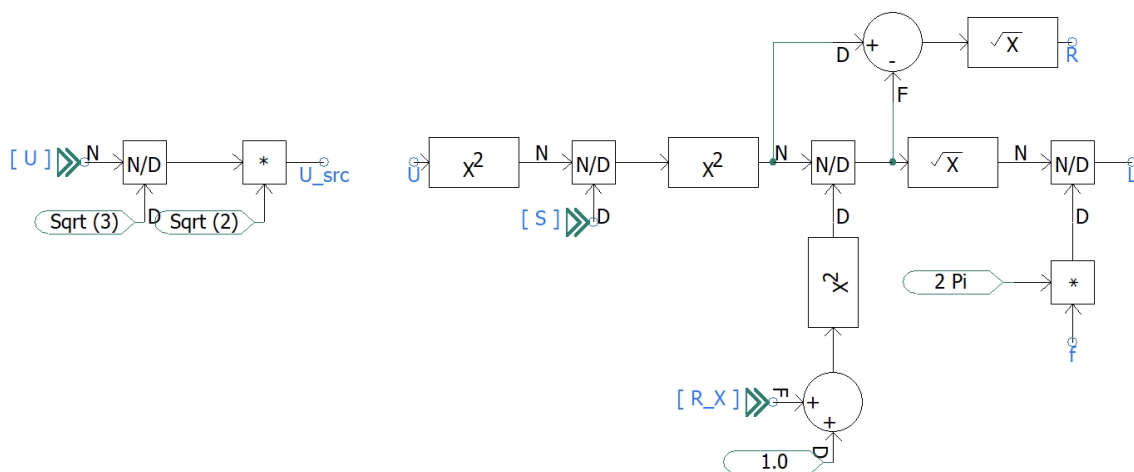
Poměr  $\frac{R}{X}$  je nastaven na výchozí hodnotu dle [41]:  $\frac{R}{X} = 0,1$ .



Obr. 6.2: Model napáječe



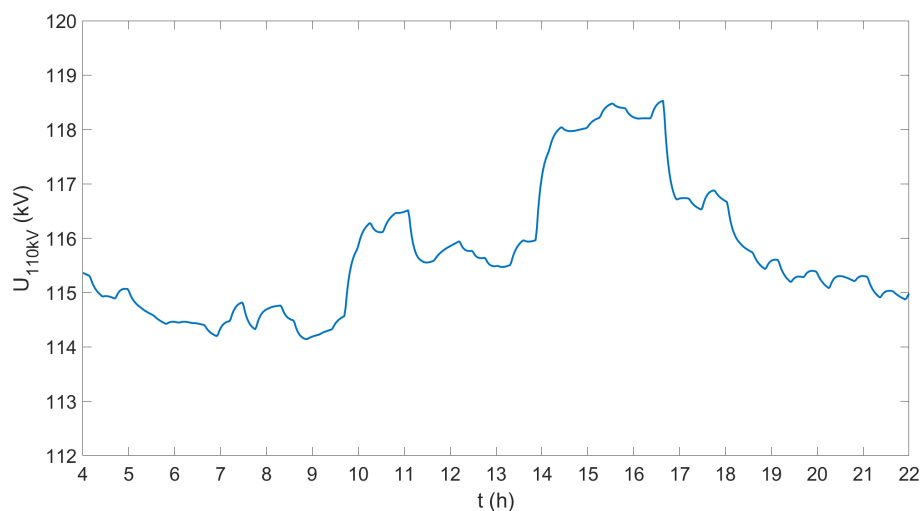
Obr. 6.3: Zapojení elektrické části modelu napáječe



Obr. 6.4: Řetězec výpočtu modelu napáječe

### 6.1.2 Parametrizace pro denní simulace

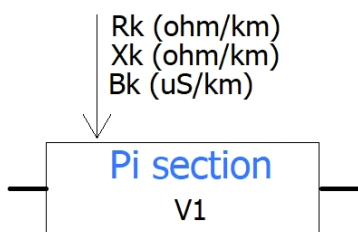
Průběh napětí při denní simulaci bude nastaven dle obr. 6.5 vygenerovaný s náhodnou složkou v programu MATLAB.



Obr. 6.5: Průběh napětí při simulaci dne

## 6.2 Model vedení

Vedení je modelováno jako  $\Pi$  článek dle obr. 6.8. Modul s popisem signálu vstupu portu s parametry vedení je vyobrazen na obr. 6.6, parametrizační tabulka s možnostmi nastavení označení vedení, jeho délky a jmenovité frekvence na obr. 6.7 a řetězec výpočtu hodnot diskretních součástí modelu vedení na obr. 6.9.



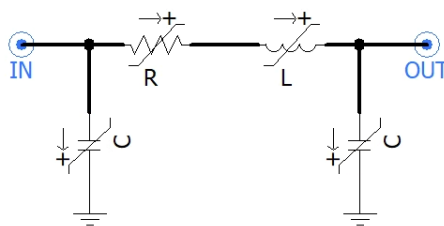
Obr. 6.6: Modul vedení

Configuration	
[Slt:Pi_Line] id='1718377208'	
Configuration	
General	
Name	V1
Parameters	
Line length	V1_length
Nominal frequency	50

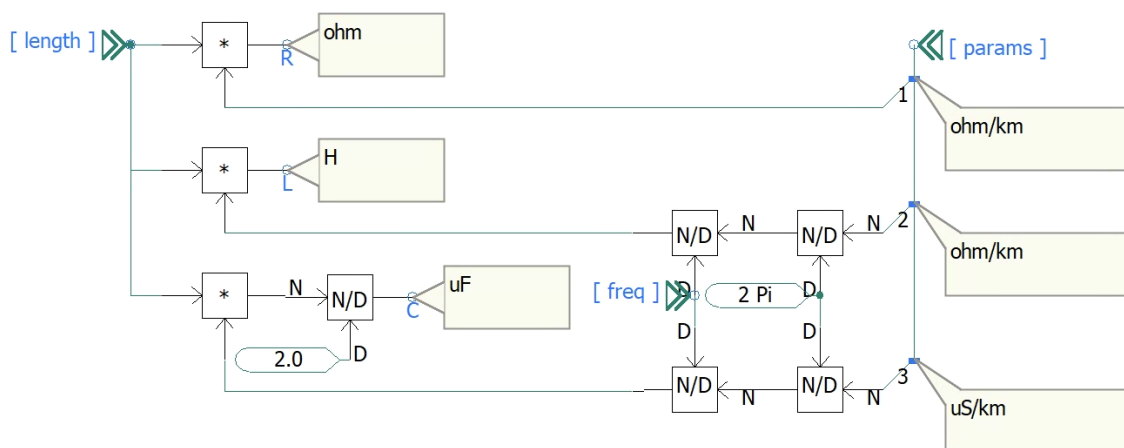
Obr. 6.7: Parametrická tabulka modulu vedení

### 6.2.1 Parametrizace

Výpis typů a délek vedení je na obr. 6.1. Měrné parametry vedení jsou uvedeny v tab. 1.2.



Obr. 6.8: Elektrická část modulu vedení



Obr. 6.9: Řetězec výpočtu modulu vedení

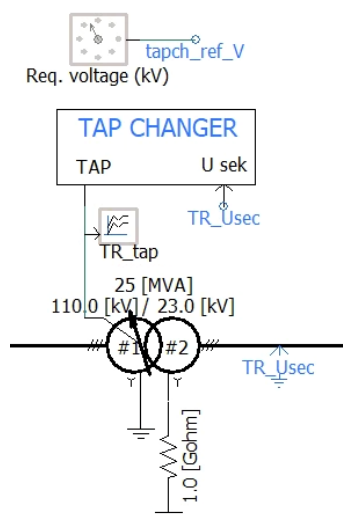
## 6.3 Transformátor

Pro modelování transformátoru je vybrán model „3 phase 2 winding transformer“ z knihovny bloků. Vzhledem k tomu, že je modelován jako 3 jednofázové jednotky namísto jedné 3f s 3. vinutím, není to přesný model používaného transformátoru. Ale analýza ztrát na transformátoru není předmětem této práce a ostatní modely transformátorů v knihovně bloků nedisponují možností přepnutí odbočky při běhu simulace. Na straně VVN je transformátor uzemněn, což odpovídá transformátorové koncepci. Na straně VN by měl být transformátor uzemněn přes tlumivku nebo rozumně velkou impedanci dle kap. 1.2.1, ale protože není nutné uvažovat zemní proudy, je uzemněn přes rezistor s hodnotu  $1 \text{ G}\Omega$  a stává se v praktickém smyslu izolovaným. Tento odpor ale zajišťuje bezproblémové měření fázových hodnot napětí. Zapojení se nachází na obr. 6.10.

Další částí transformátoru je HRT, který je popsán v kapitole níže.

### 6.3.1 Parametrizace

Pro simulaci byl vybrán transformátor o výkonu  $S_{nT} = 25\text{MVA}$ , jehož parametry jsou v tab. 1.3.



Obr. 6.10: Zapojení transformátoru s HRT

### 6.3.2 Hladinový regulátor (HRT)

Hladinový regulátor zajišťuje přepnutí odbočky v určitém nastaveném časovém intervalu pokud se o nastavenou odchylku odchýlí napětí na straně VN od  $U_c$ .

Model HRT je na obr. 6.10. Popis portů je v tabulce 6.2. Nastavitelné parametry jsou na obr. 6.11:

- Initialization time (s) ... inicializační čas, čas než započne HRT regulovat napětí,
- Deadband +- (p.u.) ... symetrické pásmo necitlivosti v p.j.<sup>1</sup> napětí,
- Slow tap change delay (s) ... čas přepnutí odbočky v pásmu pomalé regulace,
- High speed tap deviation +- (p.u.) ... symetrický limit pásma rychlé regulace v p.j.<sup>1</sup>,
- High speed tap delay (s) ... čas přepnutí odbočky v pásmu rychlé regulace,
- Taps +- ... počet odboček v kladném a záporné směru,
- Tap step (p.u.) ... krok odbočky v p.j.<sup>2</sup>,
- Secondary nom. voltage (kV) ... jmenovité napětí v kV strany VN transformátoru,
- Secondary ref. voltage (kV) ... žádané napětí v kV na straně VN.

Pro řízení přepínače odboček se používá poměrných hodnot napětí normalizovaných dle jmenovitého napětí VN strany transformátoru. Základem řídicí smyčky HRT je stavový registr (obr. 6.12).

Funkci paměti nastavené odbočky tvoří blok SaH, který je blokován XNOR

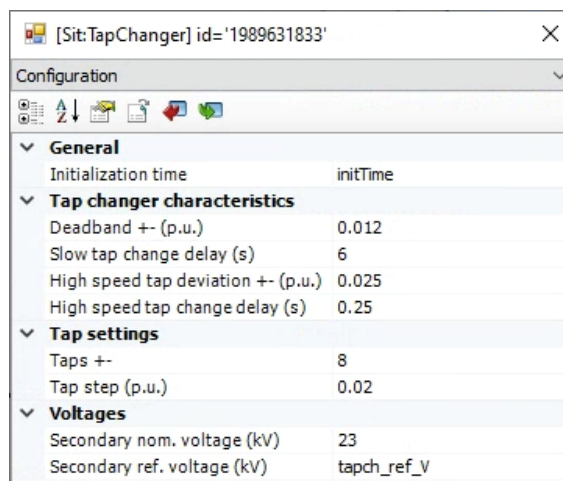
<sup>1</sup>Poměrná jednotka se pro HRT určuje vzhledem k žádanému napětí na straně VN.

<sup>2</sup>Vztažné napětí je napětí strany transformátoru, na níž se nachází přepínač odboček.



Tab. 6.2: Charakteristika portů modulu HRT

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
TAP	1	poměrný převod transformátoru	-
U sek	3	okamžitá napětí strany VN transformátoru	kV



Obr. 6.11: Parametrizační okno HRT

hradlem z části modelu zajišťující výběr směru přepnutí odbočky (obr. 6.13). Hodnota následného kroku se určí tak, že se k aktuální hodnotě odbočky buď přičte nebo se od něj odečte velikost kroku. Pro přepínání přičítání a odečítání je do ovládacího signálu přepínače přidán blok monostabilního obvodu, který prodlužuje impuls na čas kroku simulace „delta“ – nutnost z důvodu, že některé bloky pracují v části výpočtu „DSDYN“ a některé v části „DSOUT“. Toto řešení je jednodušší než snaha o přesun výpočtu ostatních bloků do jedné ze zmíněných částí. Limitace za blokem SaH v obr. 6.12 zajišťuje, aby nebylo možné navolit odbočku vyšší než je maximální přípustná.

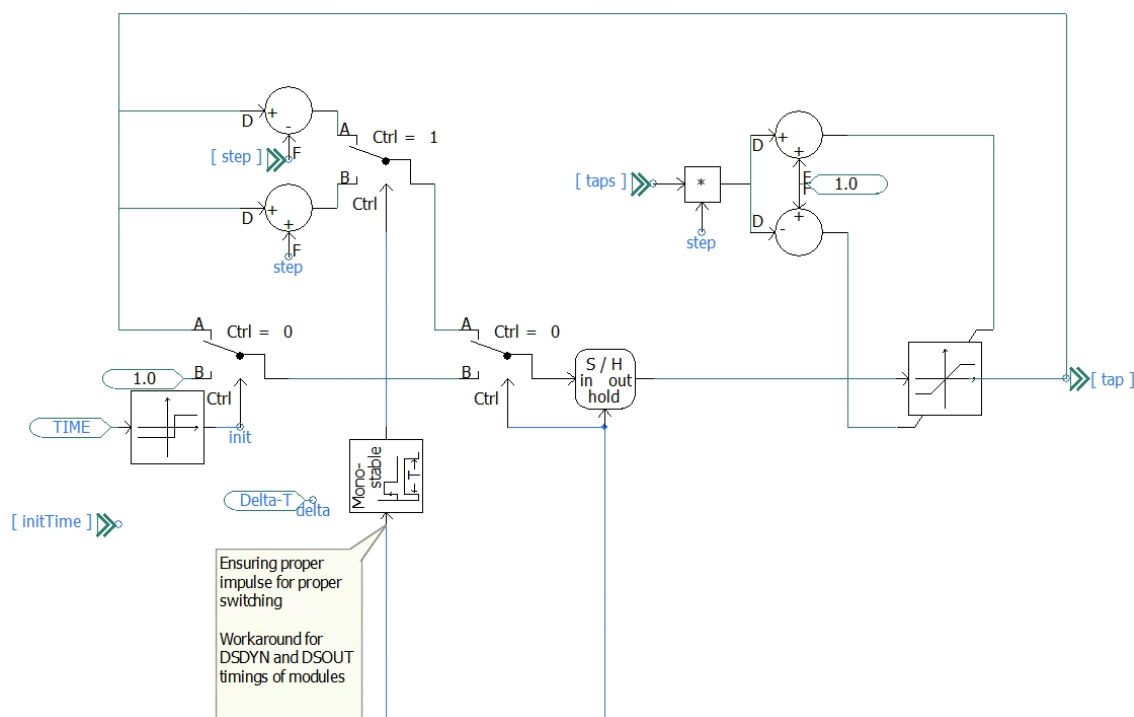
V případě, že blok SaH detekuje přechod z 1 do 0, obnoví propouštění signálu do doby, než opět detekuje přechod z 0 do 1. Toto nastane hned další krok simulace, neboť signál vstupující do hradla XNOR zároveň resetuje integrátor, který v tomto zapojení slouží jako časovač.

Převod reálných čísel na výstupu integrátoru do logických hodnot zajišťuje blok hystereze. Horní hranice je nastavena na žádané zpoždění přepnutí, zatímco spodní hranice hystereze je nastavena na hodnotu „0“ – tedy reset integrátoru. Bloky komparátoru porovnávají, zda se nevychýlila hodnota napětí strany VN mimo pásmo necitlivosti (na obr. 6.13 horní větev porovnává, zda napětí nekleslo pod spodní pásmo necitlivosti; spodní větev kontroluje horní pásmo necitlivosti) a pokud ano,

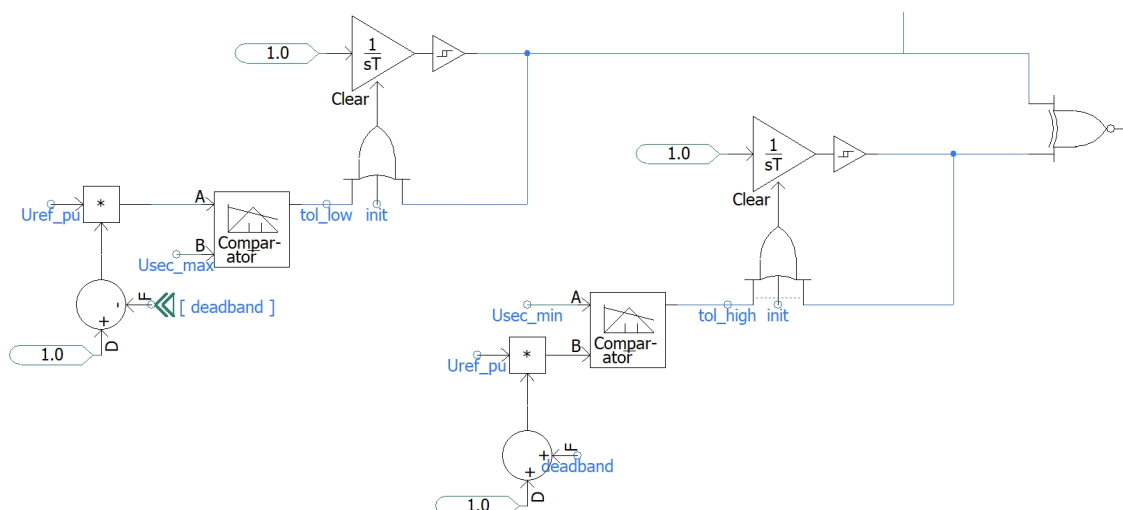
bude výstup z komparátoru „0“ a příslušný integrátor začne načítat hodnotu.

Volba zpoždění probíhá dle obr. 6.14. Opět porovnávají komparátory, zda napětí nepřekročilo limit – nyní je ale kontrolováno pásmo rychlé regulace. V případě, že napětí překročí toto pásmo, bude zpoždění přepnutí odbočky odpovídat rychlé regulaci do okamžiku, kdy se napětí objeví zpět v dovoleném pásmu necitlivosti – v tom okamžiku se resetuje blok S-R Latch a zpoždění bude opět odpovídat pomalé regulaci.

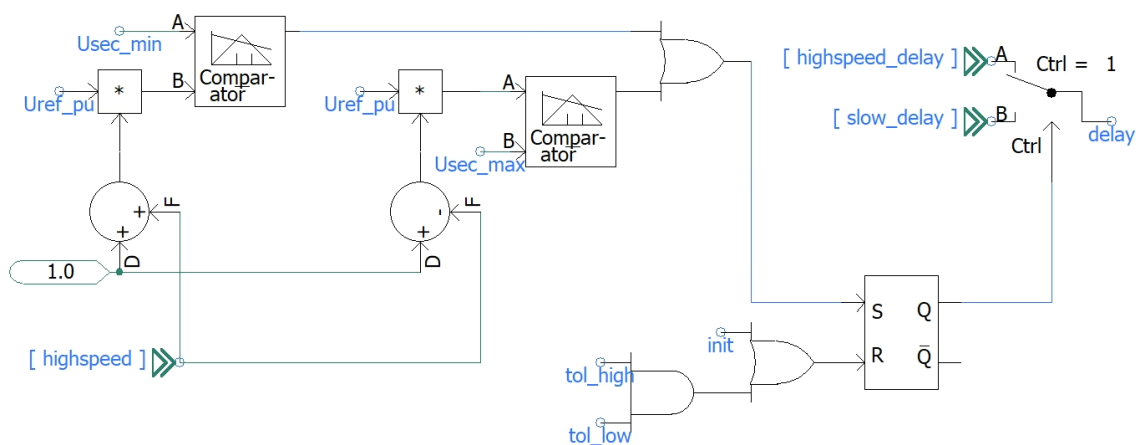
Inicializace na začátku simulace zajišťuje, aby od začátku simulace bylo na vstupním portu bloku SaH nastavení neutrální pozice odbočky, dále blokuje načítání času integrátorů a případné přenastavení zpoždění regulace z pomalé na rychlou.



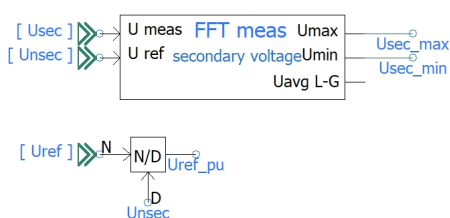
Obr. 6.12: Stavový registr modulu HRT



Obr. 6.13: Výběr správného směru přepnutí odbočky



Obr. 6.14: Výběr zpoždění přepínače



Obr. 6.15: Normalizace napětí pro HRT

## Parametrizace pro simulace ustáleného chodu

Pásmo necitlivosti dle [15] ... 1,2 %.

Pásmo rychlé regulace dle [15] ... 2,5 %.

Zpoždění přepnutí v pásmu pomalé regulace ... 0,25 s.

Zpoždění přepnutí v pásmu rychlé regulace ... 0,25 s.

Počet odboček dle tab. 1.3 ... 8.

Krok odbočky dle tab. 1.3 ... 0,02.

Jmenovité napětí strany VN transformátoru dle tab. 1.3 ... 23 kV.

Žádané napětí strany VN transformátoru dle tab. 3.3 ... 22,8 kV.

Pro simulace ustáleného chodu je vhodné, aby transformátor za relativně krátký čas simulace byl schopen přepnout dostatečně rychle odbočku.

## Parametrizace pro denní simulace

Zpoždění přepnutí v pásmu pomalé regulace ... dle [15] v řádu minut, zvoleny 2 minuty reálného času. Při kompresi času simulace 1:20 je nastaveno  $\frac{2 \cdot 60}{20} = 6$  s.

Zpoždění přepnutí v pásmu rychlé regulace ... dle [15] do 5 s. Při kompresi času simulace 1:20 je nastaveno  $\frac{5}{20} = 0,25$  s.

Ostatní parametry jsou shodné jako pro simulaci ustáleného chodu.

## Přídavný modul měření napětí

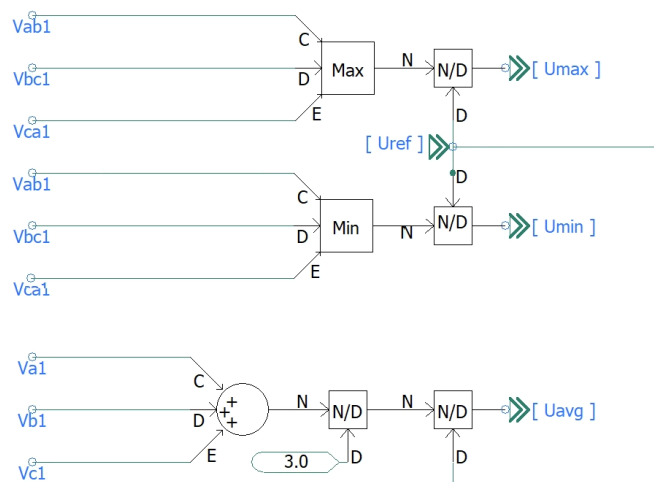
Protože pro některé moduly je multimetr dle kapitoly 5.4 zbytečně komplikovaný a je vhodné, aby byly některé moduly vyžadující měřené napětí použitelné i bez multimetru, byl vytvořen přídavný modul měření napětí (na obr. 6.16). Měření napětí probíhá shodně s měřením v kap. 5.4.3 dle obr. 5.18 (bez připojeného PLL) a 5.19. Poslední krok zpracování ale následuje dle obr. 6.17. Cílem je změřit maximální a minimální poměrnou hodnotu sdruženého napětí a průměrnou hodnotu fázových napětí. Charakteristika portů je v tab. 6.3.

Tab. 6.3: Charakteristika portů modulu přídavného měření napětí

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
U meas	3	okamžité hodnoty napětí	kV
U ref	1	referenční hodnota pro poměrné jednotky v modulu	kV
Umax	1	maximální hodnota z měř. sdružených napětí	p.j.
Umin	1	maximální hodnota z měř. sdružených napětí	p.j.
Uavg L-G	1	průměrná hodnota z měřených fázových napětí	p.j.



Obr. 6.16: Modul přídavného měření napětí



Obr. 6.17: Finální zpracování hodnot přídavného měření napětí

## 6.4 Model zátěže

Zátěž je tvořena na základě [43] a její výkon je určován dle rovnic (6.2a) a (6.2b) (řetězec výpočtu na obr. 6.21). Elektricky je zátěž tvořena jako induktivně-odporová zátěž spojená do hvězdy s izolovaným uzlem dle obr. 6.19. Modul je na obr. 6.19 s popisem portů v tab. 6.4. Parametrizace jednotlivých koeficientů a nastavení jmenovitého napětí a jmenovité frekvence je dostupná z parametrizační tabulky modulu (obr. 6.23). Není doporučeno zadávat na začátku simulace na vstupní porty hodnoty výkonů „0“, může se stát, že se ve výpočtu simulace objeví singularita. Vypínače v elektrickém zapojení na obr. 6.19 pomáhají stabilitě simulace při velmi nízkém nebo velmi vysokém nastaveném jalovém výkonu z důvodu, že jinak se při výpočtu může objevit singularita. Měření napětí a frekvence pro účely výpočtu je pomocí bloku dle kap. 6.3.2. Hodnoty odporu i indukčnosti se mění v okamžiku, kdy kterákoliv fáze projde „0“ dle obr. 6.24 – monostabilní obvod stejně jako v případě modulu HRT předchází problémům způsobenými odlišným časováním ostatních modulů řetězce výpočtu, bez ošetření v simulaci přestávalo fungovat nastavování parametrů.

Hodnoty odporu a indukčnosti jsou počítány dle rovnic (6.3b) a (6.2b) za předpokladu, že v 1 větvi prochází cívkou i rezistorem stejný proud. Sestavený řetězec výpočtu je na obr. 6.22, přidané limity zajišťují, aby se při výpočtu nedělilo „0“, popř. aby nebyly vypočteny do elektrických prvků příliš vysoké nebo nízké hodnoty odporu či indukčnosti – výpočty s velkými hodnotami indukčnosti zpomalují celý výpočet. V případě, že by byly nastaveny takové hodnoty, které by vyžadovaly nastavení parametrů mimo dovolené limity, tato větev se vypínačem odpojí.

$$P_{set} = \frac{P_n}{3} \cdot \left( \frac{U_m}{U_n} \right)^{NP} \cdot \left[ 1 + K_{Pf} \left( \frac{f_m}{f_n} \right) \right] \quad [\text{MW}; \text{MW}, \text{kV}, \text{kV}, -, -, \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (6.2a)$$

$$Q_{set} = \frac{Q_n}{3} \cdot \left( \frac{U_m}{U_n} \right)^{NQ} \cdot \left[ 1 + K_{Qf} \left( \frac{f_m}{f_n} \right) \right] \quad [\text{Mvar}; \text{Mvar}, \text{kV}, \text{kV}, -, -, \text{Hz}, \text{Hz}] \quad (6.2b)$$

kde:  $U_m$  ... měřené fázové napětí v místě připojení zátěže  
 $U_n$  ... jmenovité fázové napětí zátěže  
 $f_m$  ... měřená frekvence v místě připojení zátěže  
 $f_n$  ... jmenovitá frekvence zátěže  
 $NP$  ... napěťový koeficient činného výkonu  
 $NQ$  ... napěťový koeficient jalového výkonu  
 $K_{Pf}$  ... frekvenční koeficient činného výkonu  
 $K_{Qf}$  ... frekvenční koeficient jalového výkonu  
 $P_{set}$  ... nastavený činný výkon  
 $Q_{set}$  ... nastavený jalový výkon  
 $P_n$  ... jmenovitý činný výkon nastavený portem „P3ph“  
 $Q_n$  ... jmenovitý jalový výkon nastavený portem „Q3ph“

$$I = \frac{\sqrt{(P_{set}^2 + Q_{set}^2)}}{U_m} \quad [\text{kA}; \text{MVA}, \text{Mvar}, \text{kV}] \quad (6.3a)$$

$$R = \frac{P_{set}}{I^2} \quad [\Omega; \text{MW}, \text{kA}] \quad (6.3b)$$

$$L = \frac{Q_{set}}{I^2 \cdot 2\pi \cdot f_m} \quad [\Omega; \text{Mvar}, \text{kA}, \text{Hz}] \quad (6.3c)$$

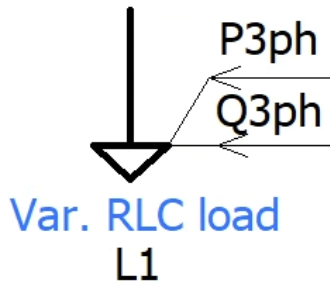
kde:  $I$  ... fázový proud zátěží  
 $R$  ... odpor jedné fáze zátěže  
 $L$  ... indukčnost jedné fáze zátěže

#### 6.4.1 Parametrizace pro simulace ustáleného chodu

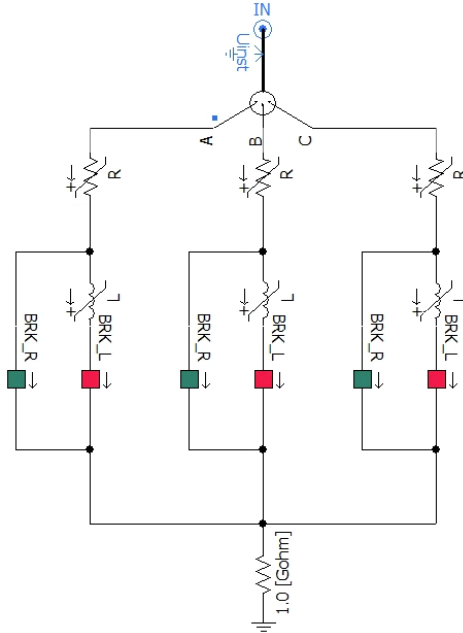
Dle 1.3 je zvoleno maximální zatížení transformátoru  $0,6S_{nT} = 0,6 \cdot 25 = 15 \text{ MVA}$ . Při 6 zátěžích je tedy možné pro 1 zátěž uvažovat s max.  $S_n = 15/6 = 1,5 \text{ MVA}$ . Při max. výkonu zátěže je účinník zvolen 0,995 dle obr. 1.3. Tedy max. činný výkon

Tab. 6.4: Charakteristika portů modulu zátěže

Označení	Rozměr	Popis	jedn.
P3ph	1	jmenovitý 3f činný výkon zátěže	MVA
Q3ph	1	jmenovitý 3f jalový výkon zátěže	Mvar



Obr. 6.18: Modul zátěže



Obr. 6.19: Elektrické zapojení zátěže

zátěže je  $P = 0,995 \cdot 2,5 = 2,487$  MW. Protože je zatížení 60 % opravdu limitní a je nutné počítat rovněž s činnými ztrátami na vedení, je zvolen odběrový výkon zátěží nižší:  $P_{zat} = 2$  MW.

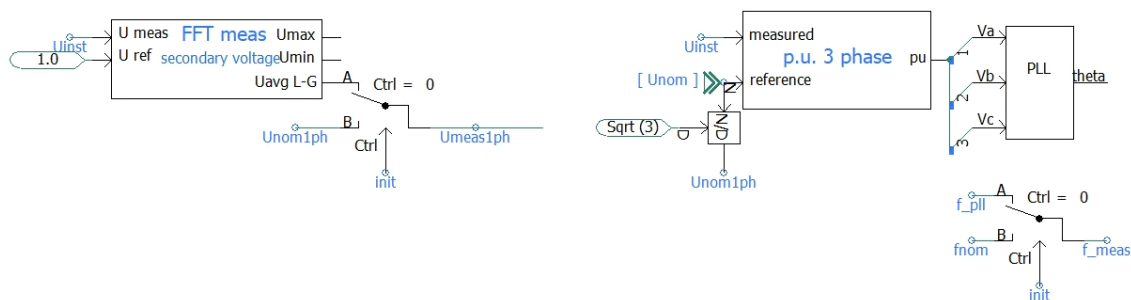
Pro ověření chování při různých úrovních zatížení vývodu budou zátěže simulovány ve 3 úrovních (hodnota Q bude určena z výkonové křivky):

- 8 %  $P_{zat} \sim 5$  %  $S_{nT}$ ,
- 50 %  $P_{zat} \sim 30$  %  $S_{nT}$ ,
- 100 %  $P_{zat} \sim 60$  %  $S_{nT}$ .

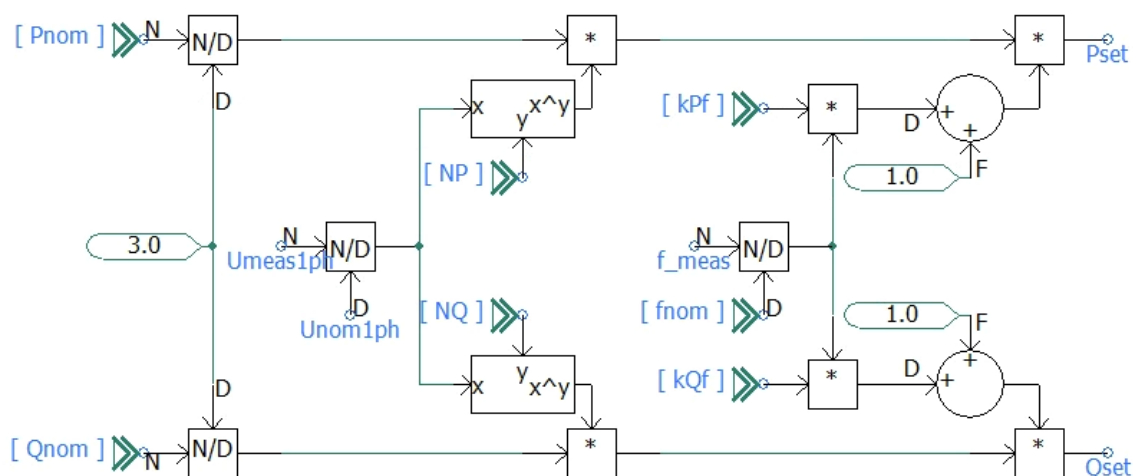
Jalový výkon je dále automaticky počítán na základě výkonové křivky z obr. 1.3.

Frekvenční koeficienty zátěže jsou 0, není simulována změna frekvence sítě.

Napěťové koeficienty budou zvoleny na základě měření [44] v reálné síti ve Velké Británii. Lze předpokládat podobnou skladbu zatížení. Tedy  $K_{Pf} = 1,2$  a  $K_{Qf} = 5,9$ . Tyto koeficienty simulují efekt tzv. samokompenzace.



Obr. 6.20: Měření napětí a frekvence modelu zátěže



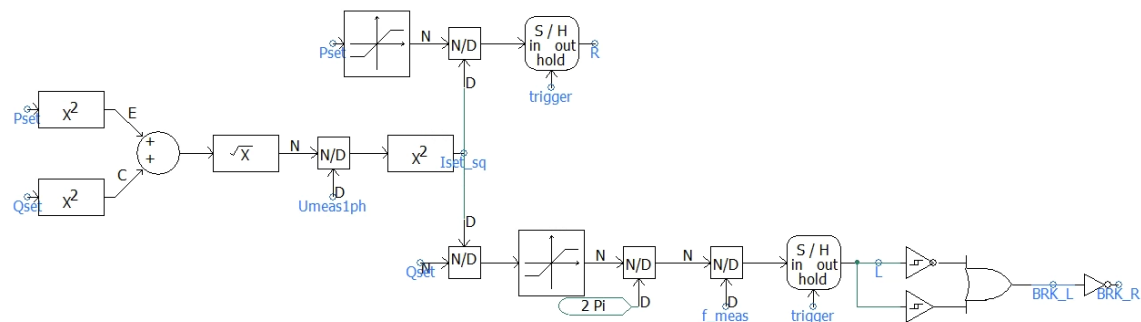
Obr. 6.21: Výpočet nastavovaného činného a jalového výkonu

## 6.4.2 Parametrizace pro denní simulace

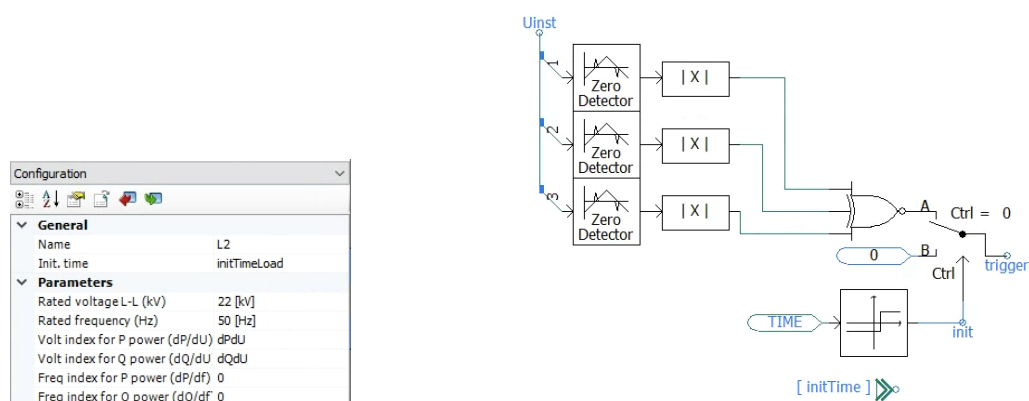
V případě denní zátěže je nastavený výkon 2 MW násoben dle charakteristiky na obr. 6.25 – byla sestavena normalizací průběhu zatížení ve dnu maxima v roce 2019 dle [3] s využitím náhodné složky vygenerované programem MATLAB.

Jalový výkon je opět určován na základě výkonové křivky a skutečně nastaveného činného výkonu.



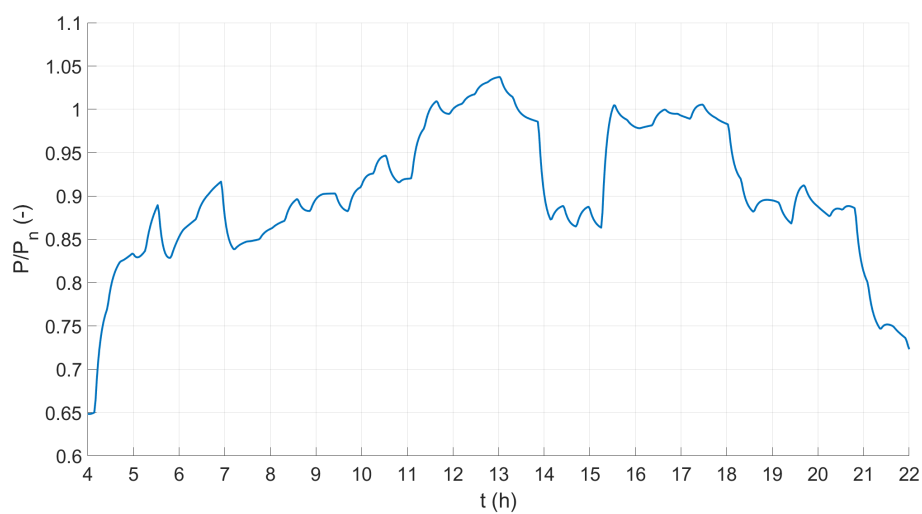


Obr. 6.22: Výpočet fázových hodnot odporu a indukčnosti



Obr. 6.23: Parametri-  
zační tabulka modulu  
zátěže

Obr. 6.24: Impuls pro změnu nastavených parametre-  
trů zátěže



Obr. 6.25: Profil činného výkonu zátěže při simulaci dne

## 6.5 Parametrizace výroby

Protože výroba je připojena do distribuční soustavy, některé parametry dle kap. 5.1 vycházejí z parametrů soustavy:

- jmenovité napětí ... 22 kV,
- jmenovitá frekvence ... 50 Hz.

Napětí použité pro řízení je vzhledem k symetrickým prvkům modelu nastaveno na průměrné. [5] ani [7] neudávají žádné požadavky k připojovaným výkonům do DS. Pouze [1] zavádí požadavek pro výroby, která při připojení na hladinu VN nesmí způsobit změnu napětí větší než 2 %  $U_c$  při provozu s neutrálním účínkem. Tento požadavek je považován pro tuto práci za výchozí pro nastavení výkonu. Proto byly zvoleny následující jmenovité výkony  $P_{max}$  pro místa připojení dle obr. 6.1:

- poz. 1 ...  $P_{max} = 4$  MW,
- poz. 2 ...  $P_{max} = 3$  MW,
- poz. 3 ...  $P_{max} = 2$  MW.

Pro případ denní simulace je výkon výroby dle místa připojení parametrizován dle charakteristiky na obr. 6.26. Charakteristika vychází z [42] a je přidán prvek náhodnosti.

Aby byl výraznější efekt regulace, byly zvoleny výkony, které mají při připojení efekt změny napětí vyšší než 2 %. Toto je vidět na obr. 7.6, 7.7 a 7.8.

P(f) charakteristika a ochrana ROCOF nebude aktivní, jejich parametry tedy nejsou důležité pro tyto simulace. Vyčkávací čas před připojení výroby by měl být dle [7] v rozmezí 10 s - 600 s. Bylo zvoleno 40 s, což při časové kompresi simulace 1:20 znamená 2 s.

Limitace nárůstu činného výkonu je nastavena pro simulace ustáleného chodu 0,33 p.j./s, z důvodu, aby simulace do 20 s bez problémů proběhla. V případě simulace ustáleného chodu je nárůst omezen na 0,033 p.j./s dle výchozího požadavku [7] (10 %/min) upraveného pro kompresi času simulace.

Problematické bylo nastavení regulátorů. Proporcionální složka regulátoru může způsobit oscilace, což se v případě simulací s tímto modelem stávalo, bylo tedy přistoupeno k eliminaci proporcionální složky – její zesílení je tedy rovno 1. Ve všech případech je integrační složka regulátoru 60 – tato hodnota se ukázala být vhodným kompromisem mezi stabilitou a rychlostí regulace.

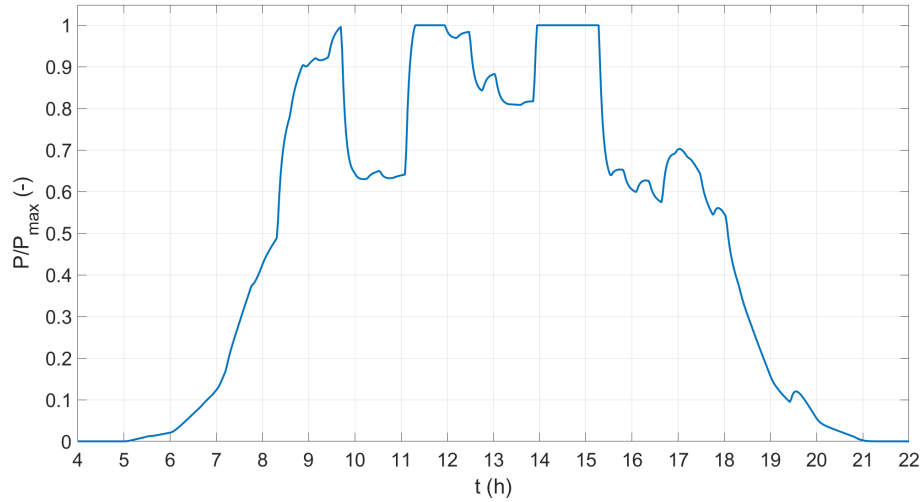
Zpoždění žádané hodnoty je nastaveno pro činný výkon na 0,5 s a jalový výkon na 1 s. Kratší zpoždění nebyla vhodná, způsobovala rovněž nestabilitu.

Přehled nastavovaných relevantních parametrů v sekci:

### 1. Inverter parameters:

- Name ... Dle výroby,
- Nominal voltage (kV) ... 22,

- Nominal power (MW) ... dle místa připojení,
  - Nominal frequency (Hz) ... 50,
  - Choose voltage control ... average,
2. P(U):
- Use P(U) ... Yes,
  - Number of points ... 3,
  - U values (p.u.) ... dle následujících kapitol,
  - P values (p.u.) ... dle následujících kapitol,
3. P(f):
- Use P(f) ... No,
4. Q control functions ... parametrizace řídicích funkcí jalového výkonu dle kap. 5.7,
- Q(U) alternative input settings ... dle následujících kapitol,
5. Q limits
- P values (p.u.) ... dle následujících kapitol,
  - Q values + (p.u.) ... dle následujících kapitol,
  - Q values - (p.u.) ... dle následujících kapitol,
6. Protection and ramp ... parametrizace implementovaných ochranných funkcí a ramp,
- Wait time after disconnect. (s) ... 2,
  - Ramp for active power (p.u./s):
    - simulace UCH ... 0,33,
    - denní simulace ..., 0,033,
  - Use ROCOF? ... No,
  - Start of ramp (s) ... 1,
7. Regulators,
- Proportional gain ... 0 pro všechny reg.,
  - Integral gain ... 60 pro všechny reg.,
  - Time constant for P reg (s) ... 0.5,
  - Time constant for Q, U, cosphi reg (s) ... 1,



Obr. 6.26: Profil činného výkonu FVE (p.j.) při simulaci dne

### 6.5.1 Parametrizace funkce $P(U)$

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.1 a 1.4, lze pro vedení VN uvažovat vliv činného a jalového úbytku na napětí v síti za přibližně stejně významný. Proto je jednou z možností jak předcházet náhlým odpojením z důvodu nadpětí v síti postupné snižování výkonu výroben. Tento postup je samozřejmě až poslední variantou, protože hlavním důvodem připojení výrobní do soustavy je právě dodávka činného výkonu.

Maximálním dovolenou trvalou odchylkou napětí dle [22] je  $1,1U_c$ , zatímco doporučené nastavení ochrany 1. stupně ochrany při nadpětí je dle [1]  $1,15 U_c$ . Není ale vhodné při parametrizaci charakteristiky spoléhat na chování sítě, které by zajistilo udržení 95 % 10minutových hodnot napětí v dovoleném rozsahu i při stále dodávce činného výkonu výrobní do sítě. Hranicí, kdy výrobní přestane dodávat výkon do sítě bude tedy nastaveno  $1,1 U_c$ .

Další volbou je strmost charakteristiky. Tato není definována v žádném z obecně platných předpisů. V rámci soustavy spravované ČEZ Distribucí je ale definováno výchozí nastavené charakteristiky na obr. 3.16, kde je strmost (a tedy směrnice) nastavena na -50. Protože je dle [1] stanovena maximální změna napětí způsobená připojením výrobní  $2 \% U_c$ , je zvolena strmost charakteristiky respektující tento požadavek – tedy že změna  $1 P_{max}$  způsobí změnu napětí  $2 \% U_c$  dle rov. (6.4):

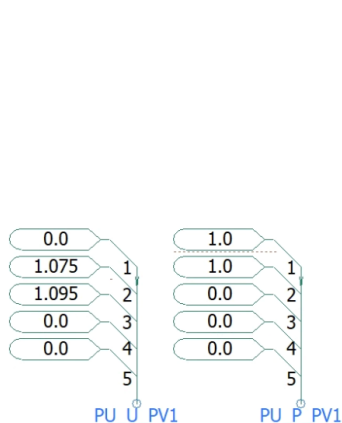
$$\frac{\Delta P}{\Delta U} = \frac{1}{0,02} = 50 \quad (6.4)$$

Další bod charakteristiky (lomový), kdy ještě nebude docházet k omezování výkonu funkcí  $P(U)$  je možné určit pro změnu  $-1 P_{max}$  pomocí rov. (6.5):

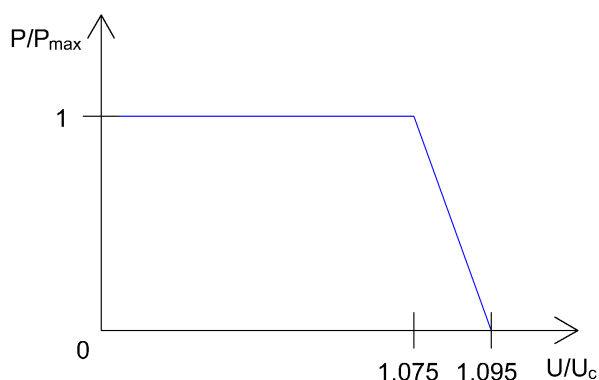
$$U_{lom} = -1 \cdot \frac{\Delta P}{\Delta U} + 1,1 = 1,09 \quad (6.5)$$

Protože je nutné ale počítat s realistickou přesností měření, je nutné tuto charakteristiku na tyto podmínky připravit. Vyhláška [45] udává pro hladinu 22 kV třídu přesnosti měření měřicích transformátorů proudu 0,5. Z tohoto důvodu je nutné tuto charakteristiku pro tento limitní případ posunout o 0,5 %  $U_c$ . V případě lepší třídy přesnosti měření lze charakteristiku upravit. Vybraná charakteristika (s předpokládanou třídou přesnosti 0,5) pro model je na obr. 6.28. Názvy signálů na obr. 6.27 jsou zadávány do příslušných polí dle kap. 5.1 a obr. 5.3.

Pro obě výrobní dle obr. 6.1 i oba druhy simulace (UCH i denní) bude použito shodné nastavení  $P(U)$ .



Obr. 6.27: Signály parametrizace  $P(U)$



Obr. 6.28: Nastavená  $P(U)$  charakteristika modelu

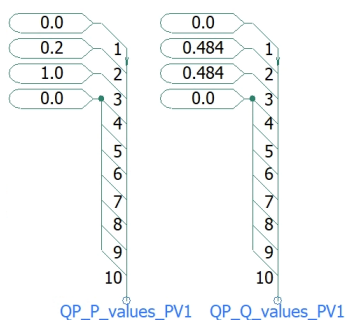
### 6.5.2 Parametrizace dostupného jalového výkonu – $Q(P)$ oblast

Pro nesynchronní výrobní kategorie A1, B1, B2 a C je relevantní nastavení charakteristiky dle obr. 3.9 – výchozí i přísný požadavek. Dle [1] je požadováno přísné nastavení. Protože tato práce má cíl ověřit možnosti regulace, bude ověřováno nastavení při přísnějším nastavení dle obr. 6.30. Tvorba signálu, jejichž označení je zadáno do příslušných parametrů dle kap. 5.1 je na obr. 6.29. Toto nastavení je společné pro obě výrobní i všechny simulace.

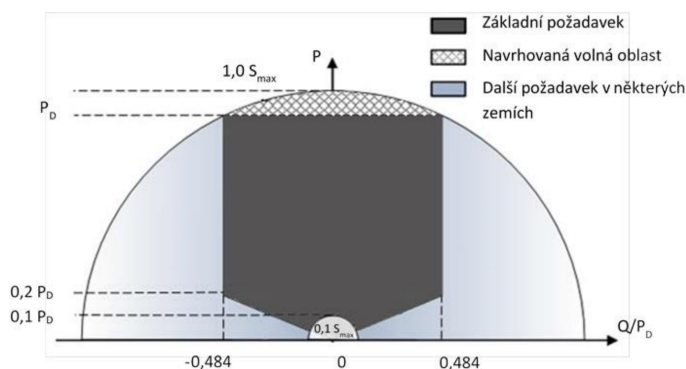
### 6.5.3 Varianty parametrizace funkce $Q(U)$ pro simulaci UCH

Z rozboru v kap. 3.5.3 a 4.4 je patrné, že je nutné zvolit vhodná nastavení charakteristik. Proto bylo připraveno několik variant dle obr. 6.31.

Hranici maximálního sklonu charakteristiky lze určit z míry, jakou má jalový výkon vliv na napětí v DS. Toto lze určit z poměru činné a jalové složky vedení,



Obr. 6.29: Signály parametrizace  $Q(P)$

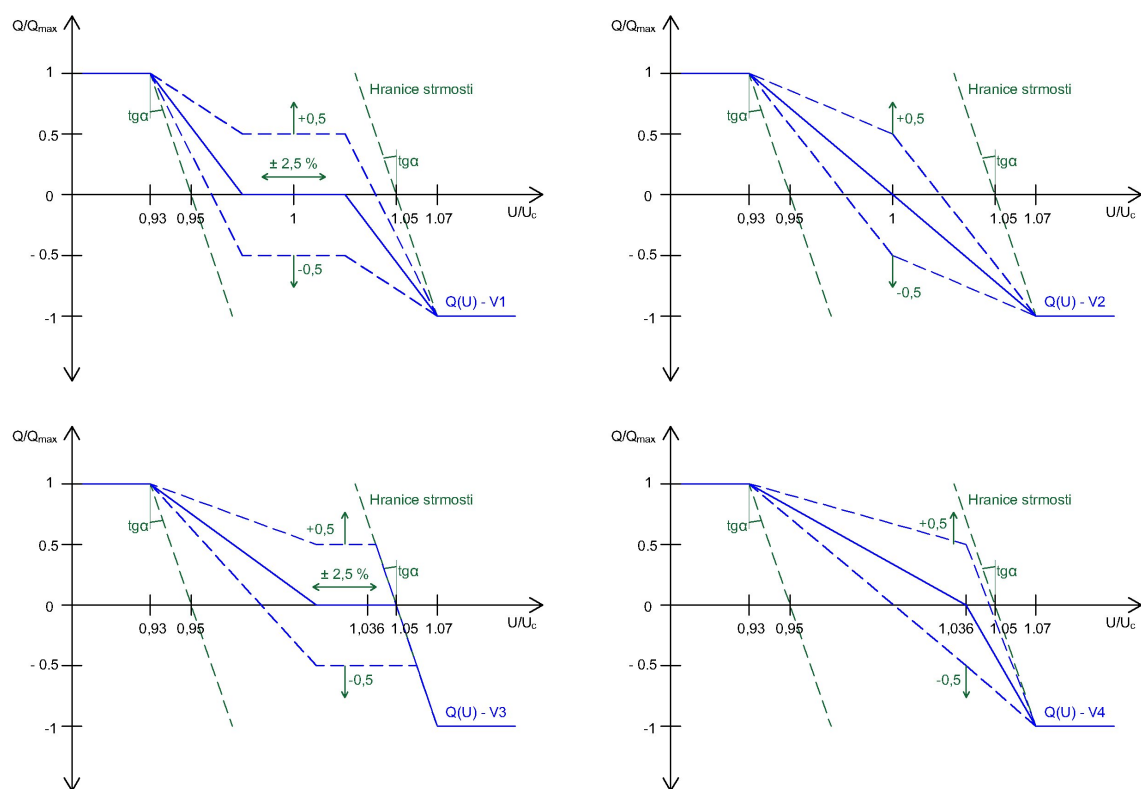


Obr. 6.30: Nastavená  $Q(P)$  charakteristika modelu

které se pro distribuční soustavu pohybuje cca v rozsahu  $\frac{X}{R} = 2$  dle kapitoly 1.1 a [8]. Při maximální citlivosti by měla tedy změna dodávky jalového výkonu o úrovni  $P_{max}$  dvojnásobný vliv na napětí soustavy než stejná změna činného výkonu. Nastavený limit výkonu je ale dle 6.30 0,484, což se dá považovat za přibližně poloviční hodnotu. Bude pro omezení strmosti charakteristiky použita stejná limitní hodnota směrnice jako pro charakteristiku  $P(U) - 0,02$ .

Varianty lze rozdělit na varianty s pásmem necitlivosti (V1 a V3) a varianty bez pásma necitlivosti (V2 a V4). Zvolenou parametrizací je variace charakteristik dle zvoleného žádaného napětí. Varianty V1 a V2 mají žádanou hodnotu napětí na úrovni  $1,0 U_c$ , což odpovídá 22 kV. Charakteristiky V3 a V4 mají nastaveno žádané napětí  $1,036 U_c$ , což odpovídá žádanému napětí na sek. straně transformátoru – 22,8 kV.

Poslední variací je offset každé z variant o  $0,4 Q_{max}$  jak do oblasti dodávky, tak odběru pro vizualizaci efektu, který tato variace způsobí. Ve výsledku je simulováno 12 variant nastavení charakteristiky dle obr. 6.31 a tab. 7.1.



Obr. 6.31: Možnosti nastavení  $Q(U)$  charakteristiky pro UCH

## 7 Simulace ustálených chodů

V rámci simulování UCH jsou ověřovány způsoby nastavení dle tab. 7.1. Je aktivní pouze 1 výrobná – PV1 dle obr. 6.1. Zátěže jsou aktivní všechny. Výroba je tedy koncentrována do 1 vývodu.

Protože se také jedná o velký počet scénářů, je zvolena délka simulace 20 s. Bylo zjištěno, že tato doba je pro ustálení veličin dostatečná. Sběr dat byl proveden pomocí možnosti v kartě „Project“ dle obr. 7.1. Bohužel tato možnost umožňuje ukládání pouze celého průběhu simulace. Pro další zpracování bylo využito možností programu MATLAB a extrahovány hodnoty pouze z poslední 0,5 s, které byly dále zprůměrovány.

Tab. 7.1: Seznam scénářů pro simulace ustáleného chodu

var.	výrobná PV1				zátěže	
	pozice <sup>(1)</sup>	řízení <sup>(2)</sup>	nast. / žád. hodn. <sup>(3)</sup>	výkon <sup>(4)</sup> (%)	výkon <sup>(5)</sup> (%)	počet sim.
v1	-	-	-	0	8; 50; 100	3
v2	1, 2, 3	$\cos \varphi$ fix	1,00	10:10:100	8; 50; 100	93
v3	1, 2, 3	$\cos \varphi$ fix	-0,97	10:10:100	8; 50; 100	183
v4	1, 2, 3	$\cos \varphi$ fix	-0,95	10:10:100	8; 50; 100	273
v5	1, 2, 3	$\cos \varphi$ fix	0,97	10:10:100	8; 50; 100	363
v6	1, 2, 3	$\cos \varphi$ fix	0,95	10:10:100	8; 50; 100	453
v7	1, 2, 3	$U_{\text{žád}}$	22,8 kV	10:10:100	8; 50; 100	543
v8	1, 2, 3	$U_{\text{žád}}$	22,0 kV	10:10:100	8; 50; 100	633
v9	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,025+0,5	10:10:100	8; 50; 100	723
v10	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,025+0,0	10:10:100	8; 50; 100	813
v11	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,025-0,5	10:10:100	8; 50; 100	903
v12	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,000+0,5	10:10:100	8; 50; 100	993
v13	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,000+0,0	10:10:100	8; 50; 100	1083
v14	1, 2, 3	$Q(U)$	1,000+0,000-0,5	10:10:100	8; 50; 100	1173
v15	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,025+0,5	10:10:100	8; 50; 100	1263
v16	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,025+0,0	10:10:100	8; 50; 100	1353
v17	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,025-0,5	10:10:100	8; 50; 100	1443
v18	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,000+0,5	10:10:100	8; 50; 100	1533
v19	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,000+0,0	10:10:100	8; 50; 100	1623
v20	1, 2, 3	$Q(U)$	1,036+0,000-0,5	10:10:100	8; 50; 100	1713

(1) Pozice dle obr. 6.1.

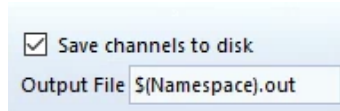
(2) Mód řízení  $Q$  dle kap. 3.5.3.

(3) Nastavení pro:

- $\cos \varphi$  fix ... žádaný  $\cos \varphi$ ,
- $U_{\text{žád}}$  ... žádané napětí,
- $Q(U)$  ... <žádané napětí v p.j.>+<necitlivost v p.j.>+<offset v p.j.>; reference pro napětí a činný výkon je určena dle kap. 5, reference jalového výkonu je  $Q_{\text{max}}$ .



- (4) Referenční výkon pro výrobu v pozici:
- 1 ... 4 MW,
  - 2 ... 3 MW,
  - 3 ... 2 MW.
- (5) Referenční činný výkon pro zátěže ... 2 MW.



Obr. 7.1: Nastavení pro ukládání kanálů do souboru

## 7.1 Automatizace simulace

Vzhledem k počtu scénářů bylo nutné celý proces simulování automatizovat. V knihovně bloků se nalézá blok „Multiple Run“. Umožňuje dle [30] opakovat simulaci s předepsanou změnou konfigurovaných parametrů mezi simulacemi. Ale vzhledem k počtu měnících se parametrů bylo přistoupeno ke kombinaci s vyhledávacími tabulkami. „Multiple Run“ tedy pouze určuje, která simulace právě probíhá a dle příslušného řádku nastavení ve vyhledávací tabulce dojde k předání parametrů příslušným signálům dle obr. 7.3. Dále je vypočítán jalový výkon výroby dle výkonové křivky na obr. 1.3.

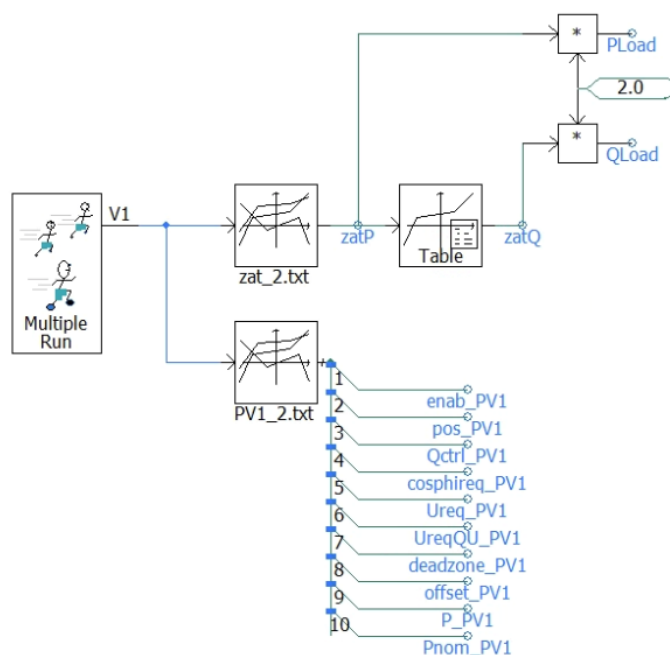
Parametrické soubory pro vyhledávací tabulky „X-Y table“ jsou vytvořeny v programu MATLAB a příklad jedné z nich je na obr. 7.2 – jedná se o standardní .txt s hodnotami oddělenými mezerou. Podrobnosti o specifikaci tabulky lze nalézt v [30]. Veškeré parametry jsou zadávány v souladu s očekávanými vstupy jednotlivých bloků v předchozích kapitolách.

```

1  ! XY table characteristics
2  !
3  !
4  ! X      Y
5  1.0 1.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.1 4.0
6  2.0 1.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.1 4.0
7  3.0 1.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.1 4.0
8  4.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.1 4.0
9  5.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.2 4.0
10 6.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.3 4.0
11 7.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.4 4.0
12 8.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.5 4.0
13 9.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.6 4.0
14 10.0 0.0 1.0 4.0 1.00 22.0 1.000 0.025 0.0 0.7 4.0

```

Obr. 7.2: Příklad zadávacího souboru s parametry pro vyhledávací tabulku pro PV1



Obr. 7.3: Zapojení bloku „Multiple Run“ pro automatizaci simulací

## 7.2 Zhodnocení výsledků

Výsledky byly graficky zpracovány rovněž v programu MATLAB. V následujících kapitolách jsou naměřené hodnoty analyzovány.

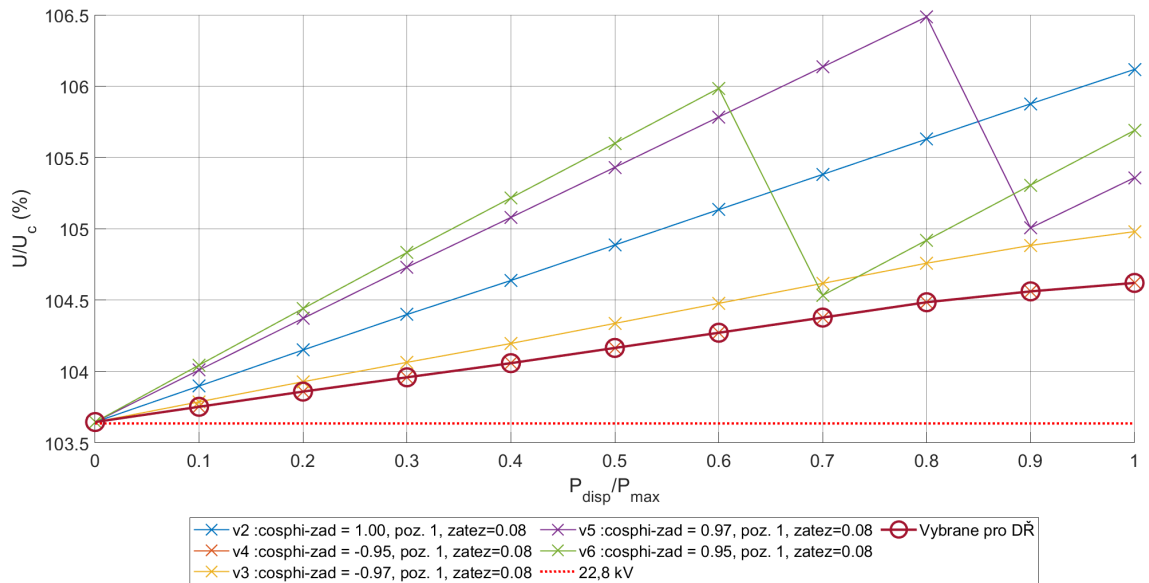
### 7.2.1 Volba příslušných charakteristik pro DŘ zadáváním $\cos \varphi$

Protože není k dispozici přesný algoritmus volby zadávaného  $\cos \varphi$  výrobnám, bylo nutné simulovat všechny zadávané možnosti –  $\pm 0,95$ ;  $\pm 0,97$ ; 1 a z naměřených charakteristik určit optimální nastavení. Jako rozhodující byl zvolen co nejmenší rozdíl mezi měřeným napětím a žádaným napětím 22,8 kV, pokud možno bez přepnutí odbočky (přepnutí odbočky je možné vidět na obr. 7.4 u char. v5 a v6).

Na obr. 7.4 a 7.5 je možné vidět princip volby zadaného  $\cos \varphi$ .

### 7.2.2 Zhodnocení charakteristik při maximálním výkonu výroby

Na obr. 7.6, 7.7 a 7.8 jsou vyznačeny úrovně napětí v jednotlivých místech připojení pro jednotlivé řídicí charakteristiky včetně jejich simulací s jejich variacemi pomocí nastavení offsetu, tedy dispečersky žádaného kompenzačního výkonu. Jsou zde vyznačeny úrovně napětí pro všechny 3 úrovně zatížení –  $\Delta$  značí napětí při nízkém zatížení vývodu (8 %), tečka střední zatížení (50 %) a  $\nabla$  značí napětí při vysokém zatížení. Úsečky značí různé módy řízení napětí. Barevně jsou pro přehlednost seskupeny.



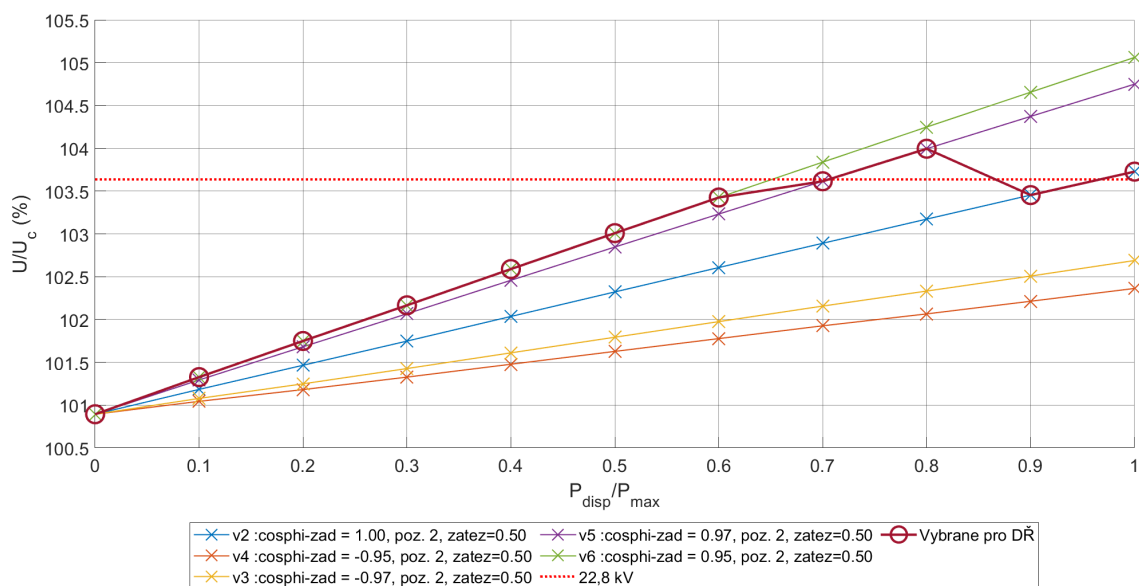
Obr. 7.4: Příklad volby průběhu zadávaného  $\cos \varphi$  při DŘ pro FVE na poz. 1 při zatížení = 0,1 v závislosti na disponibilním výkonu

V závislosti na místě připojení výrobní je patrný i vliv vzdálenosti od transformátoru a směr úbytku napětí. Při větší elektrické vzdálenosti výrobní od transformátoru se efekt zvýšení napětí dodávkou činného výkonu navyšuje i s nižším jmenovitým výkonem výrobní.

K přepnutí odbočky transformátoru došlo pouze při řízení na zadané napětí a výrobní v pozici 1, což může vést k závěru, že příliš vysoký kompenzační výkon je pro soustavu nevhodný; výrobní na ostatních pozicích nebyly schopné dodat regulační výkon na úrovni výrobní na pozici 1. Stav odbočky je zobrazen za popisem varianty řízení. Rovněž nedošlo k omezení činného výkonu v žádném ze scénářů.

Obr. 7.6 zachycuje výsledky simulace při připojení výrobní na pozici 1. Je patrné navýšení napětí v síti, při připojení výrobní i výrazná změna napětí se změnou zatížení jak při vývodu bez výrobní (v1) tak s výrobní, ale při provozu s neutrálním účínkem (v2). Je naopak při porovnání módu s neutrálním účínkem s kterýmkoliv dalším módem řízení patrné snížení rozptylu napětí při různých zatíženích, stejně jako příspěvek k eliminaci vlivu výrobní. Při nízkém a středním zatížení vývodu je rovněž patrné obrácení směru úbytku napětí směrem k transformátoru.

Jak bylo rozebráno v kap. 3.5.3, řízení na zadanou hodnotu napětí je schopné respektovat citlivost vedení, což je vidět na obr. 7.6 v pozici 1 při řízení na zadané napětí. Při této variantě bylo napětí s mnohem nižším rozptylem než v ostatních módech. Napětí v místech odběru dále od transformátoru již odpovídá standardnímu poklesu napětí při zvyšující se vzdálenosti od napáječe. I zde je patrný nižší rozptyl napětí při řízení na zadanou hodnotu napětí i zvýšení hodnoty napětí se zvýšením



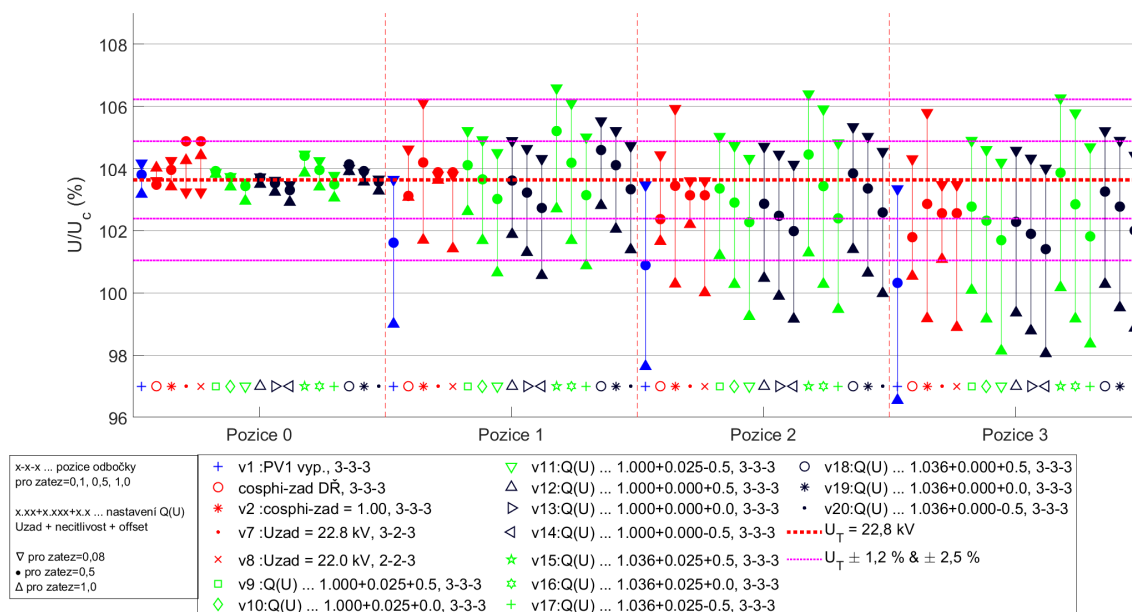
Obr. 7.5: Příklad volby průběhu zadávaného  $\cos \varphi$  při DŘ pro FVE na poz. 2 při zatížení = 0,5 v závislosti na disponibilním výkonu

hodnoty napětí v pozici 1, byť při zvýšení zatížení napětí opět značně poklesne. Současná strategie s řízením na zadaný účinník rovněž přináší zlepšení napěťových poměrů.

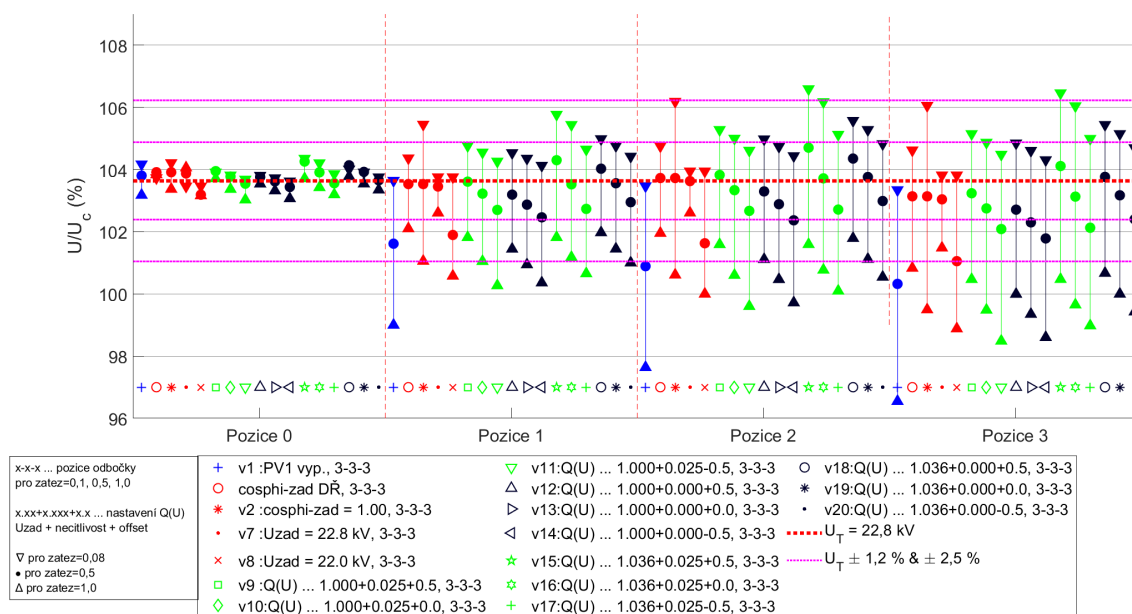
Charakteristiky  $Q(U)$  bez necitlivosti (v13, v19) přibližují napětí při FVE v pozici 1 žádanému napětí mírně agresivněji než charakteristiky s necitlivostí (v10, v16), tento efekt se přenáší i na vzdálenější místa v síti.

Rovněž vliv kompenzačního výkonu odpovídá předpokladu – při zvýšení dodávky napětí roste, při snížení napětí klesá. Při žádaném napětí 22,8 kV je vliv kompenzačního výkonu při výrobě v pozici 1 vyšší než při žádaném napětí 22 kV.

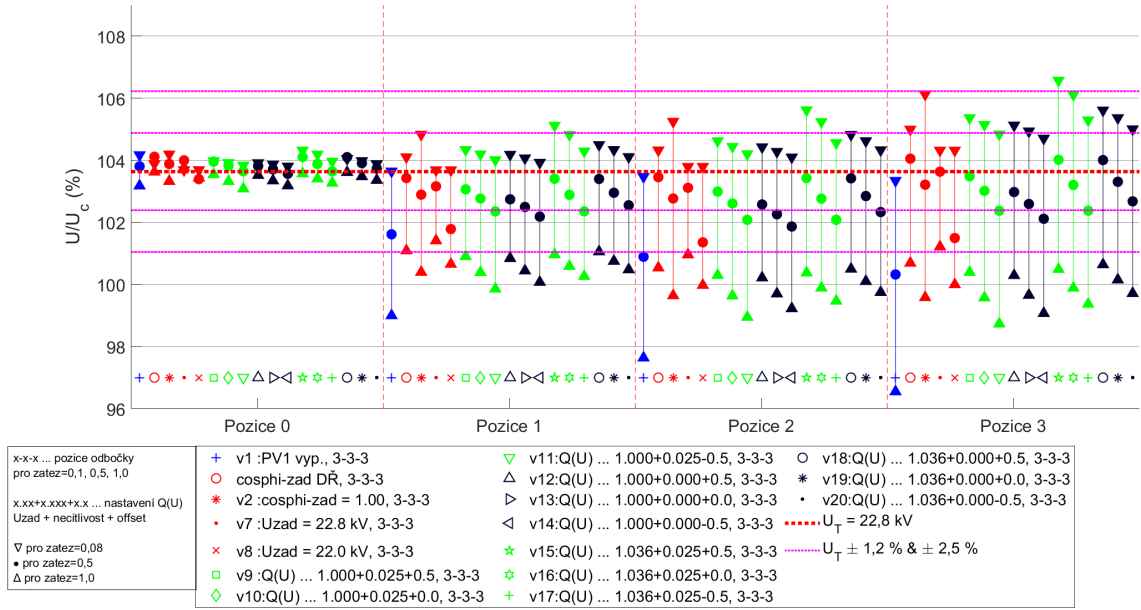
Charakteristiky napětí se v zásadě při připojování výroben do vzdálenějších pozic (obr. 7.7 a 7.8) neliší extrémně. Je zde ale patrná větší citlivost převážně na činný výkon, ale i na jalový – výrobní i s nižším disponibilním výkonem vytvoří změnu napětí větší než blíže k transformátoru – síť se stává měkčí. A naopak módy řízení na žádané napětí i DŘ ztrácí schopnost udržovat napětí na zadané hodnotě.



Obr. 7.6: Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 1



Obr. 7.7: Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 2



Obr. 7.8: Úroveň napětí pro různá zatížení a módy řízení při PV1 v pozici 3

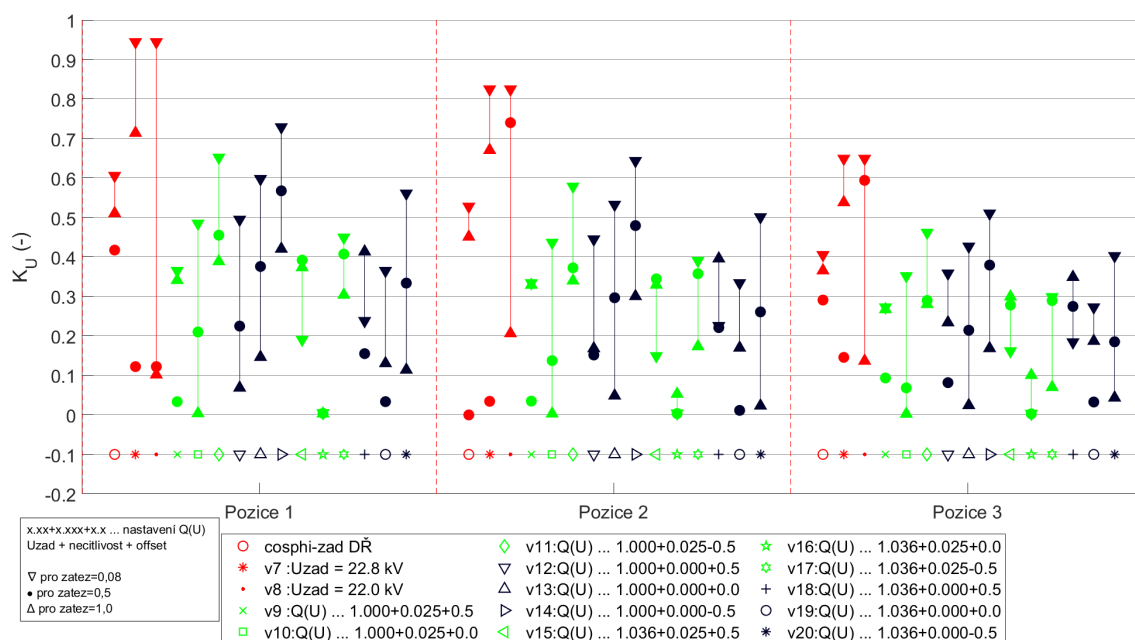
Pro objektivnější zhodnocení schopnosti výroby eliminovat svůj vliv na základě ukazatele je použit napěťový koeficient (rov. (7.1)), který umožňuje srovnat míru nápravy změny napětí způsobené výrobou při provozu při neutrálním účinníku. Opět je možné vyhodnotit nejefektivnější řízení jako řízení na zadané napětí, popř. dispečerské, které umožňují reagovat s respektem k citlivosti sítě.

$$K_U = \frac{|U_{vN} - U_{U_{v2}}|}{|U_{v2} - U_{U_{v1}}|} \quad [-; V, V, V, V] \quad (7.1)$$

kde:  $U_{vN}$  ... napětí v PM N-té varianty.

Jak je možné vidět na obr. 7.9, schopnost výroby napravit napětí se nesnižuje s lineárně klesajícím výkonem při narůstající vzdálenosti lineárně. Rovněž je možné vidět, že nejvyšší schopnost nápravy napětí mají módy řízení v7 a v8. Je tu ale zřetelně efekt, kdy došlo při scénáři v7 a v8 k přepnutí odbočky při středním zatížení, které ovlivnilo koeficient.

Při srovnání  $Q(U)$  charakteristik s necitlivostí a bez necitlivosti je vidět pozitivní vliv charakteristik bez necitlivosti na výraznější nápravu parametrů, stejně jako vliv kompenzačních výkonů na nápravu, popř. zhoršení ukazatele.



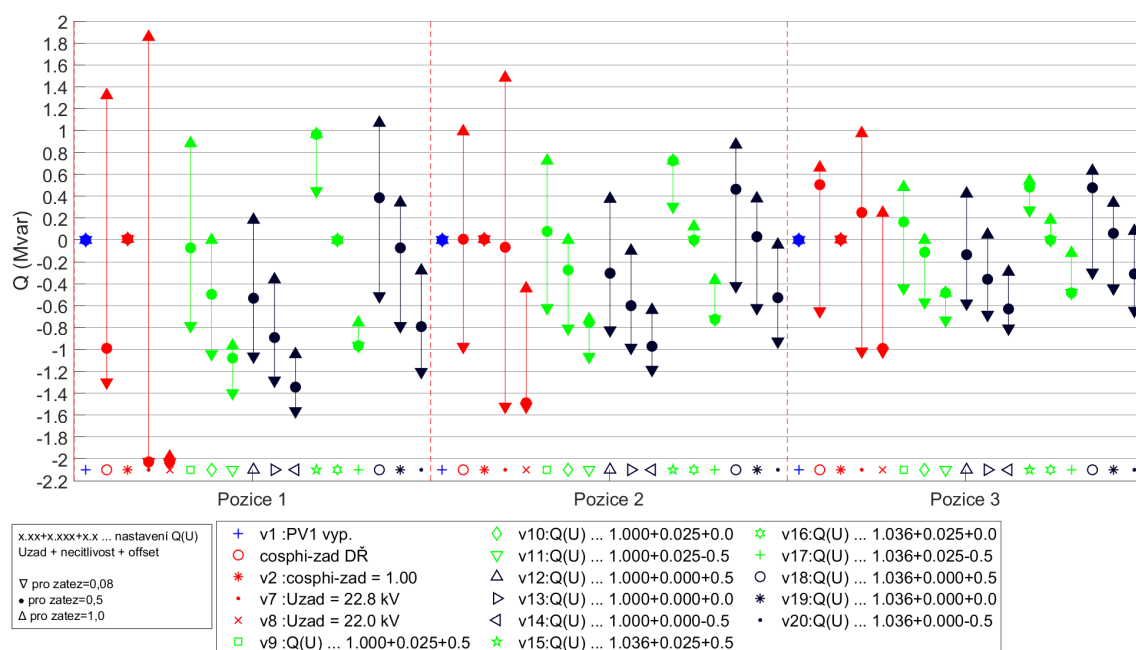
Obr. 7.9: Napěťový koeficient výroby v závislosti na pozici výroby a zatížení vývodu

## Zhodnocení dle jalového výkonu

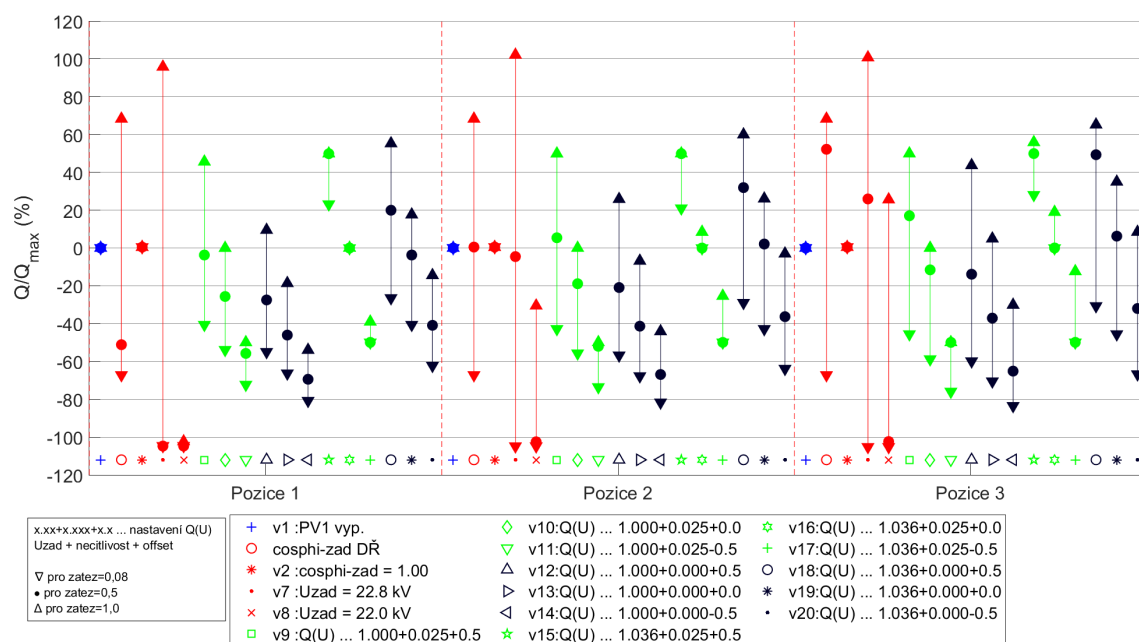
Na obr. 7.10 je zobrazen využitý regulační rozsah výroben ro scénáře řízení při připojení výroby do konkrétní pozice. Je vidět, že při scénáři v7 a 8 regulovala výroba velkým množstvím regulačního výkonu. Na obr. 7.11 je také vidět, že při v7 i v8 výroba při vysokém zatížení využila celý svůj regulační potenciál. To také znamená, že při větších odchylkách by výroba nemohla poskytnout dodatečnou regulaci a dále by nebyla schopná zajištění podpory sítě.

Se vzdáleností od transformátoru se rozšiřuje využitý rozsah regulace, ale nezvyšuje se způsobem, který by odpovídal snižování výkonu výroben, soustava dále od výroby reaguje více na dodávaný jalový výkon.

Obr. 7.12 vyznačuje tok  $Q$  přes transformátor (kladný je tok z hladiny 110 kV do 22 kV). Je možné zde vidět výraznější toky přes transformátor při vysokém regulačním výkonu výroby, což může přispět k navýšení ztrát v obou hladinách. I zde je vidět vyšší regulační výkon, který přispívá k vyšší nápravě napětí na vývodu s výrobou.

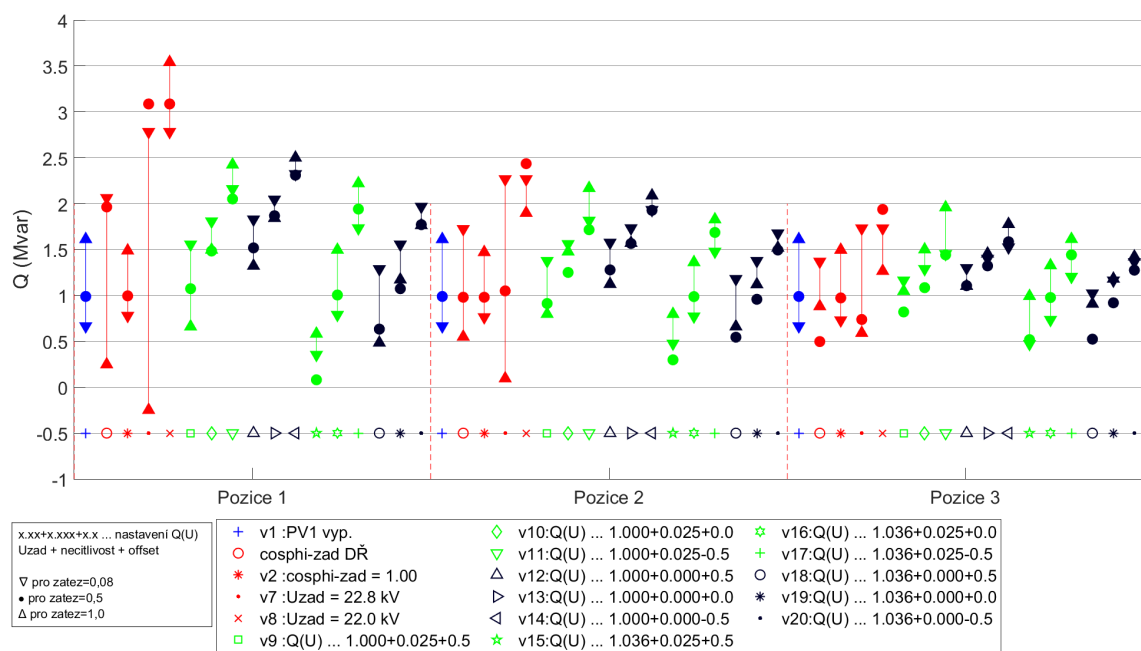


Obr. 7.10: Úrovně  $Q$  výrobní v závislosti na pozici výrobní a zatížení vývodu



Obr. 7.11: Úrovně  $Q$  výrobní v p.j. v závislosti na pozici výrobní a zatížení vývodu





Obr. 7.12: Úrovně  $Q$  na sek. straně transformátoru dle pozice výroby a zatížení vývodů

## Zhodnocení dle ztrát na vývodu s výrobnou

Na obr. 7.13 jsou zobrazeny ztráty činného výkonu na vývodu s výrobnou. Maximální ztráty (více než dvojnásobné oproti nejbližším nižším ztrátám při návazných simulacích) dosahuje vývod při provozu bez výroby. I zde je vidět negativní vliv vysokého kompenzačního výkonu u var. v7 a v8 nárůstem ztrát.

Obecně jsou ale při připojené výrobě nejnižší ztráty při středním zatížení vývodu. V tomto případě je spotřebovaný výkon dodáván do zátěží vývodu převážně připojenou decentrální výrobnou. Čím je výroba vzdálenější transformátoru, tím více narůstají ztráty. Také je patrné snížení ztrát při snížení přetoku jalového výkonu mezi soustavami při provozu výroby s offsetem +0,5 (v9, v12, v15, v18) – tedy dodatečnou dodávkou  $Q$  a navýšení ztrát při zvýšení přetoku jalového výkonu mezi soustavami při provozu výroby s offsetem -0,5 (v1, v14, v17, v20) – tedy dodatečným odběrem  $Q$ .

Velký nárůst ztrát při připojené výrobě na poz. 3 je také důsledkem menšího průřezu vedení použitého na poslední úsek.

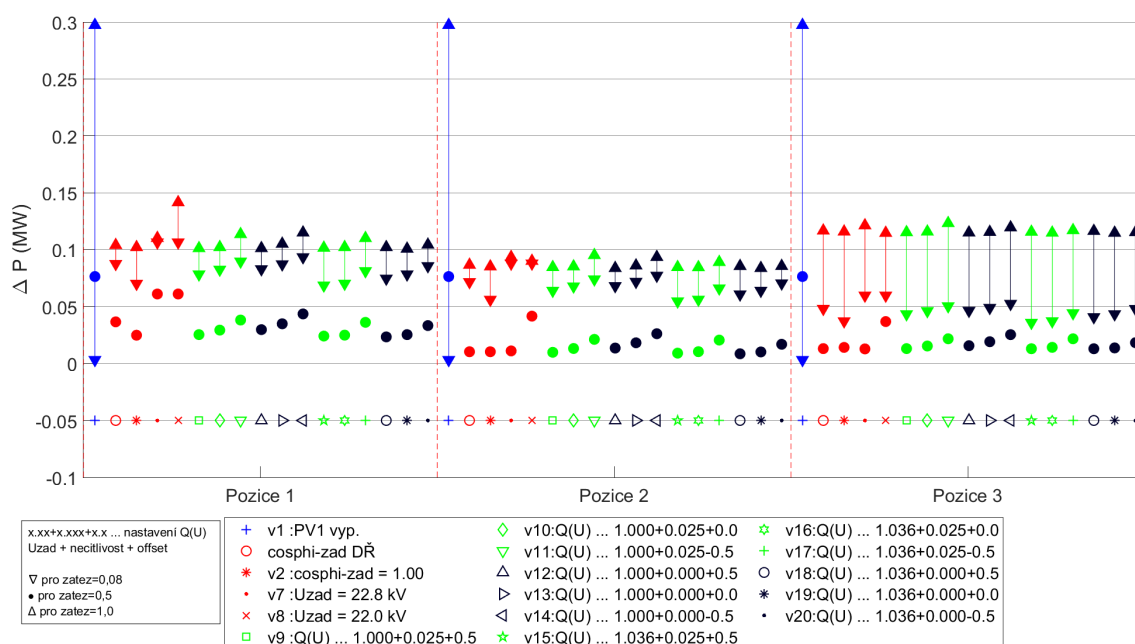
Ztráty jsou počítány dle rovnice (7.2).

$$\Delta P = P_{vyv1} + P_{PM} - P_{L1} - P_{L2} - P_{L3} \quad [W; W, W, W, W, W] \quad (7.2)$$

kde:  $P_{vyv1}$  ... dodávka činného výkonu do celého vývodu,

$P_{PM}$  ... dodávka činného výkonu výrobnou,

$P_{Lx}$  ... odběr činného výkonu zátěží x.



Obr. 7.13: Ztráty vývodu s výrobnou v závislosti na pozici výrobní a zatížení vývodu

### 7.2.3 Zhodnocení charakteristik v závislosti na disponibilním výkonu

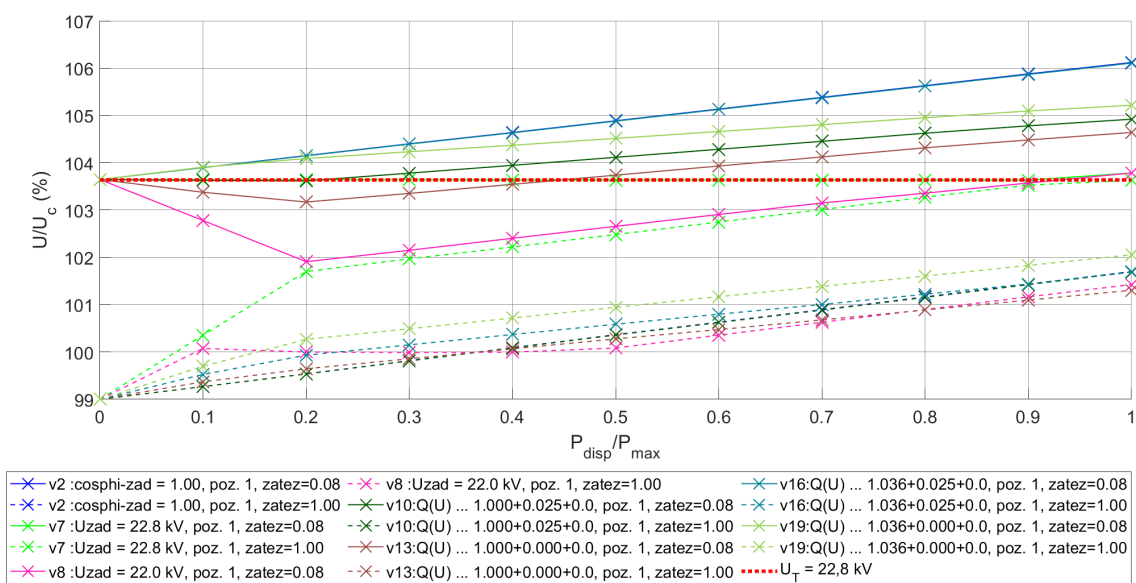
Pro vizualizaci chování řízení i v závislosti na disponibilním výkonu výrobní jsou v této části zhodnoceny také napětí, dodávka jalového výkonu výrobní a přetok jalového výkonu mezi soustavami při nízkém a vysokém zatížení a také při připojení výroben do místa poz. 1 a poz. 3.

#### Výrobní na pozici 1

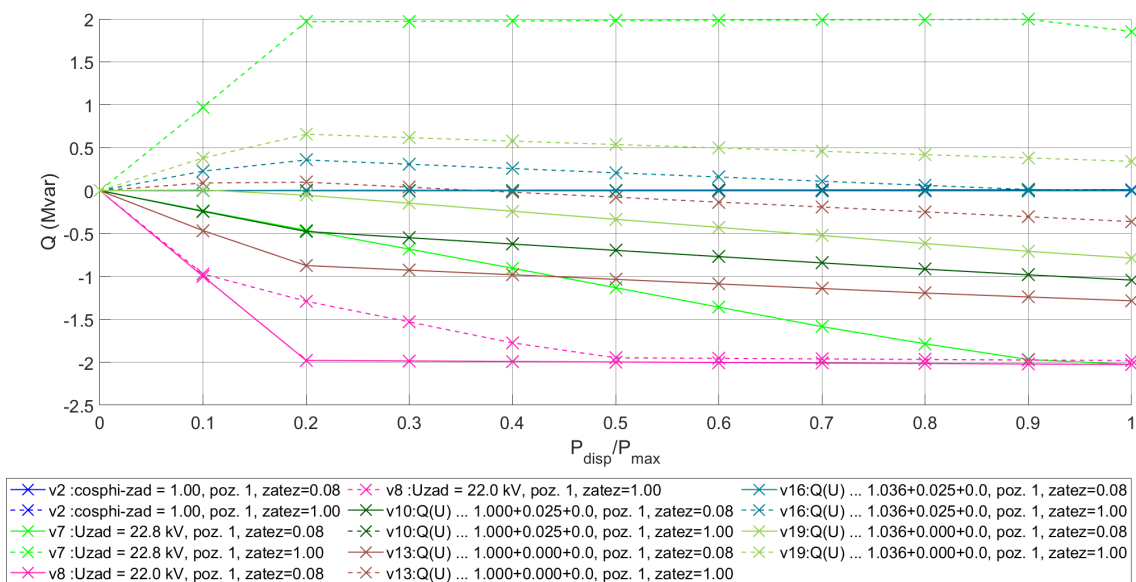
Na obr. 7.14 je zobrazen průběh napětí v závislosti na disponibilním výkonu výrobní. Je zde vidět výrazná změna napětí při var. v7 a v8, která se zvětšuje do limitu jalového výkonu při  $0,2 P_{max}$ . Nárůst jalového výkonu výrobní je rovněž zobrazen na obr. 7.15.

Při ostatních variantách je vyráběný jalový výkon nižší a podpora navyšování dodávky nebo odběru jalového výkonu je rovnoměrněji rozdělena do celého pásma disponibilního činného výkonu.

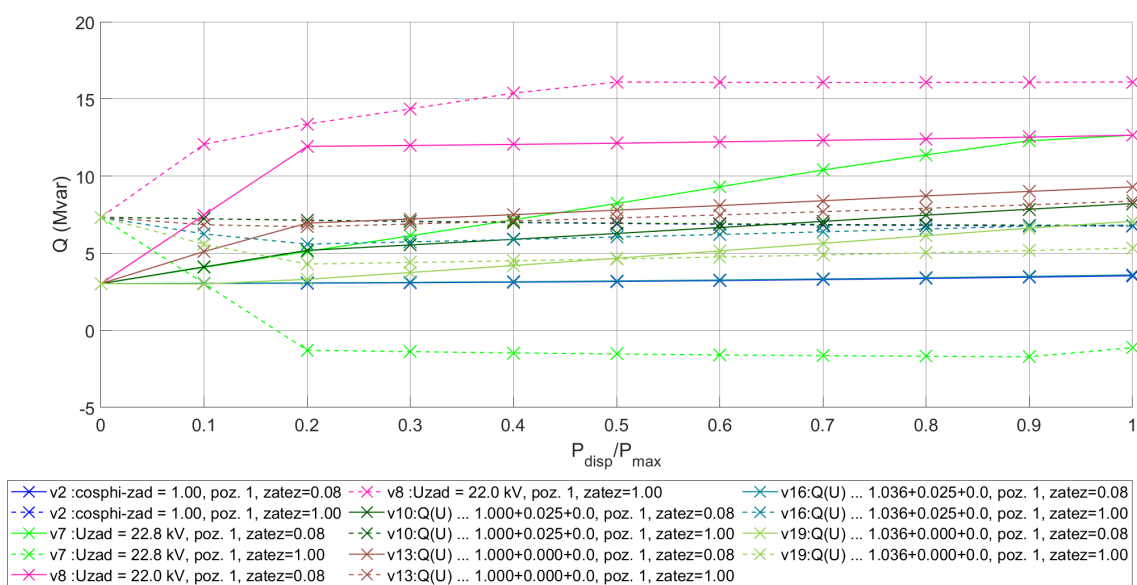
Výrazný tok výkonu var. v7 a v8 je rovněž vyobrazen na obr. 7.16. Nejnižší přetok z řídicích charakteristik zajišťuje na poz. 1 var. v16, při níž se výroba  $Q$  snižovala se zvyšováním výkonu (při maximálním výkonu bylo napětí v dovoleném pásmu necitlivosti), var. v19 bez pásma necitlivosti dodávku mírně zvýšila. Varianty s žádaným napětím  $1,0 U_c$  způsobily zvýšení přetoku.



Obr. 7.14: Napětí v přípojném místě v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 1



Obr. 7.15: Úrovně  $Q$  výroby v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výroba v poz. 1

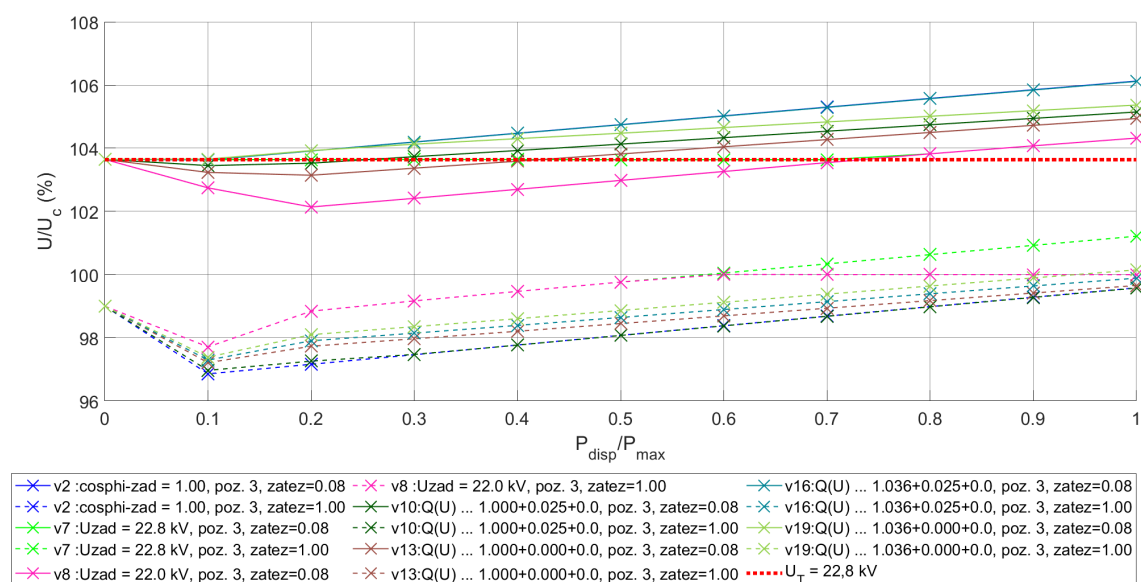


Obr. 7.16: Úrovně  $Q$  na sek. straně transformátoru v závislosti na disp. výkonu výrobní a módu řízení, výrobní v poz. 1

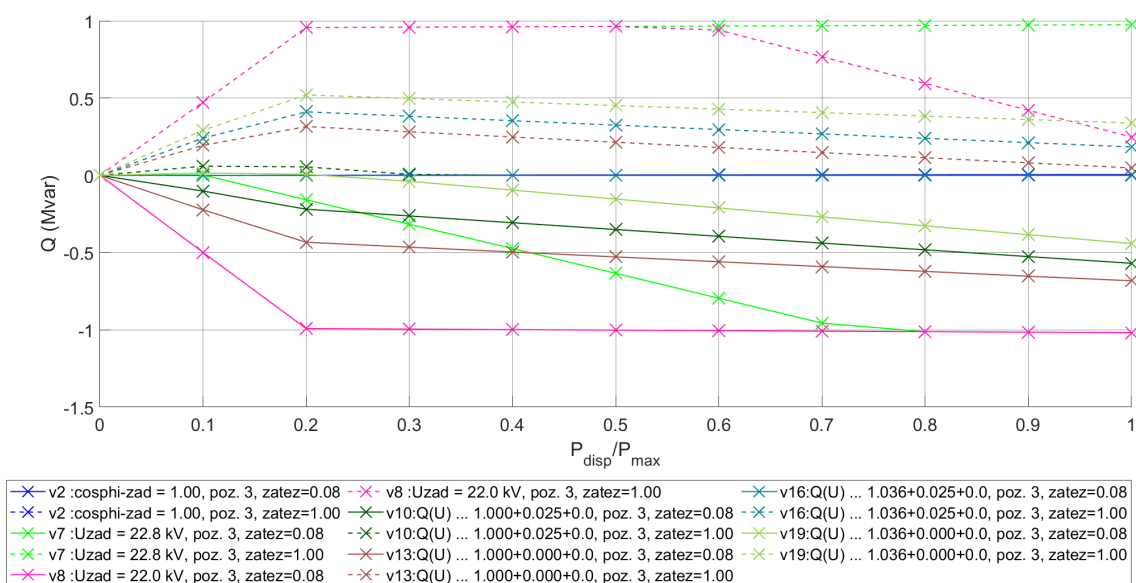
### Výrobná na pozici 3

V závislostech na obr. 7.17 je znát nižší dostupný regulační potenciál výroby nižšího výkonu, napětí mají nižší rozptyl a jsou více závislá na zatížení vývodu i na výkonu výroby. rovněž var. v7 a v8 udrží napětí na žádané hodnotě jen po omezený rozsah výkonu.

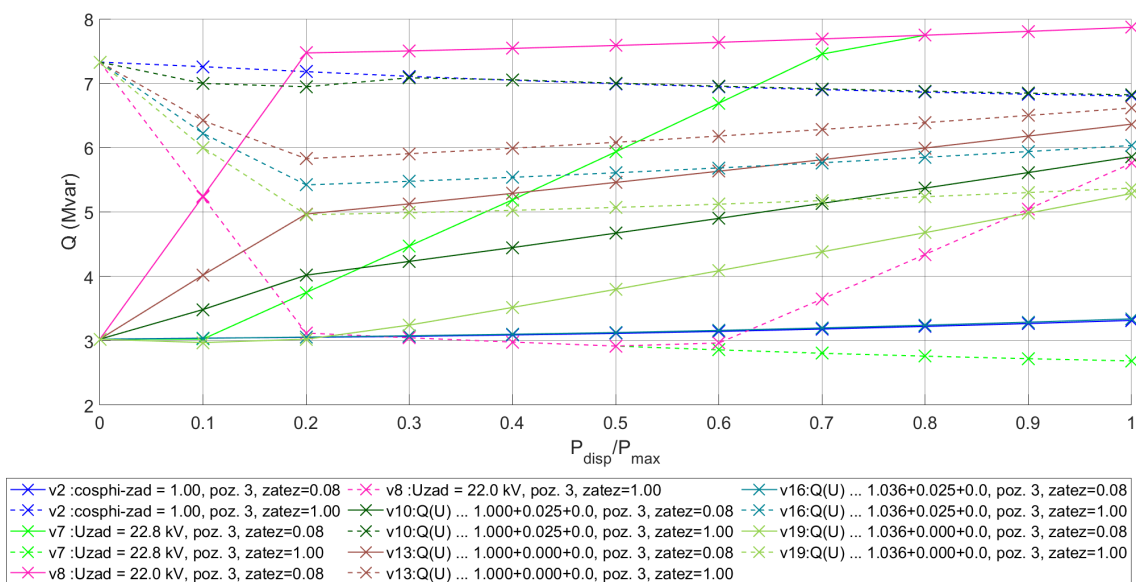
Opět ale narůstá výroba jalového výkonu dle obr. 7.18 při v7 a v8 velmi rychle do plného jalového výkonu při úrovni  $0,2 P_{max}$ . Z hlediska char.  $Q(U)$  lze opět považovat charakteristiky bez necitlivostí za agresivnější při regulaci napětí. Rovněž charakteristiky s nastaveným napětím  $1,0 U_c$  využívají pro regulaci širší pásmo než charakteristiky s  $1,036 U_c$ . Nicméně stále navyšují nutnost dodávky ze soustavy 110 kV méně než var. v1 bez regulace či v7 a v8 s regulací na napětí (výjimkou je nízké zatížení vývodu, kdy regulace na žádané napětí pozitivně ovlivňuje i přetok na transformátoru).



Obr. 7.17: Napětí v přípojném místě v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výrobná v poz. 3



Obr. 7.18: Úrovně  $Q$  výroby v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výrobná v poz. 3



Obr. 7.19: Úrovně  $Q$  na sek. straně transformátoru v závislosti na disp. výkonu výroby a módu řízení, výrobná v poz. 3

## 8 Simulace průběhu části dne

Zhodnocením výkonnosti řízení při i jiném než ustáleném chodu a vlivu více výroben na soustavu, byla provedena parametrická simulace také pro část dne s parametry odpovídající realistickému nastavení prvků a chování sítě. Simulace reálného času by ale zabrala příliš dlouhý čas. Bylo přistoupeno ke kompresi času 1:20 – 1 s simulačního času odpovídá 20 s skutečného času a v 1 s skutečného času zahrnuje průběh 1,5 periody síťové frekvence. Omezujícími podmínkami jsou jednotlivá nastavená zpoždění – není vhodné, aby se parametry měnily výrazně během periody, simulace se poté stává nestabilní. Rovněž byl navýšen simulační krok na 500  $\mu$ s – umožnil by analyzovat signály až do 20. harmonické, pro analýzu pouze na síťové frekvenci poskytne dostatečnou přesnost.

Celkový simulační čas 24 hod je dle rov. (8.1) 4320 s. Simulace je provedena pro zjištění dopadu výroby FVE na DS. Protože výrobní dle charakteristiky na obr. 6.26 začíná vyrábět až v čase 5 h, simulace začne od 4 h (pro ustálení simulace před dodávkou výroben). Konec dodávky výroben (a tedy i simulace) je v 22 h.

Charakteristiky byly upraveny pro průběh 24 h, je nutné tedy pro účel simulace vypočítat čas trvání simulace dle rov. (8.2b) a fiktivní „simulační čas začátku“ a dle rov. (8.2a).

$$t_{sim,celk} = \frac{t_{sek,24h}}{m} = \frac{60 \cdot 60 \cdot 24}{20} = \frac{86400}{20} = 4320 \text{ s} \quad (8.1)$$

kde:  $t_{sim,celk}$  ... celkový čas simulace,

$t_{sek,24h}$  ... počet s v 24 h,

$m$  ... měřítko simulace.

$$t_{sim,start} = \frac{t_{start,h} \cdot 60 \cdot 60}{m} = \frac{4 \cdot 60 \cdot 60}{20} = 720 \text{ s} \quad (8.2a)$$

$$t_{sim} = \frac{t_{konec,h} \cdot 60 \cdot 60}{m} - t_{sim,start} = \frac{22 \cdot 60 \cdot 60}{20} - 720 = 3240 \text{ s} \quad (8.2b)$$

kde:  $t_{sim,start}$  ... fiktivní začátek simulace dle měřítka,

$t_{sim}$  ... doba trvání simulace,

$t_{start,h}$  ... čas začátku simulace v h pro výpočet fiktivního začátku,

$t_{konec,h}$  ... čas konce simulace v h.

Byly simulovány 3 scénáře (parametrizace dle tab. 8.1):

1. obě PV deaktivované,
2. obě PV aktivované s příslušnou  $Q(U)$  charakteristikou dle kap. 8.1,
3. obě PV aktivované s příslušnou  $Q(U)$  charakteristikou dle kap. 8.1 a aktivním DŘ dle kap. 8.2.



Tab. 8.1: Parametry výroben pro simulaci dne

simulace	FVE	pozice <sup>(1)</sup>	řízení <sup>(2)</sup>	nastavení <sup>(3)</sup>	výkon <sup>(4)</sup> (MW)
1	PV1	-	-	-	deaktivovaná
	PV2	-	-	-	deaktivovaná
2	PV1	1	$Q(U)$	1,036+0,025+0,0	4
	PV2	6	$Q(U)$	1,000+0,000+0,0	2
3	PV1	1	$Q(U)$	1,036+0,025+DŘ	4
	PV2	6	$Q(U)$	1,000+0,000+DŘ	2

(1) Pozice dle obr. 6.1.

(2) Múd řízení  $Q$  dle kap. 3.5.3.

(3)  $\langle \text{žádané napětí v p.j.} \rangle + \langle \text{necitlivost v p.j.} \rangle + \langle \text{offset v p.j. nebo DŘ} \rangle$ ; reference pro napětí a činný výkon je určena dle kap. 5, reference jalového výkonu je  $Q_{max}$  dle obr. 6.30.

(4)  $P_{max}$  výrobný; skutečný výkon dle charakteristiky na obr. 6.26.

## 8.1 Výběr vhodné $Q(U)$ charakteristiky

Protože je žádoucí simulovat efekt řízení přetoku přes transformátor, je nutné zvolit vhodné charakteristiky, které toto eliminovat umožní. Vybíráno je pouze z  $Q(U)$  charakteristik, protože řídit variantu s žádaným napětím v místě připojení dle přetoku transformátoru by bylo problematické.  $Q(U)$  charakteristika umožňuje zadávání kompenzačního výkonu přímo.

V případě pozice 1 je zvolena charakteristika v16, která sice v základním stavu dle kap. 7.2.2 neposkytl výraznou podporu pro eliminaci důsledku připojení výrobný k vývodu, ale rovněž nepřispěla ke zvýšení toku  $Q$  mezi soustavami přes transformátor. Poskytne tedy pro dispečerské řízení plný rozsah jalového výkonu.

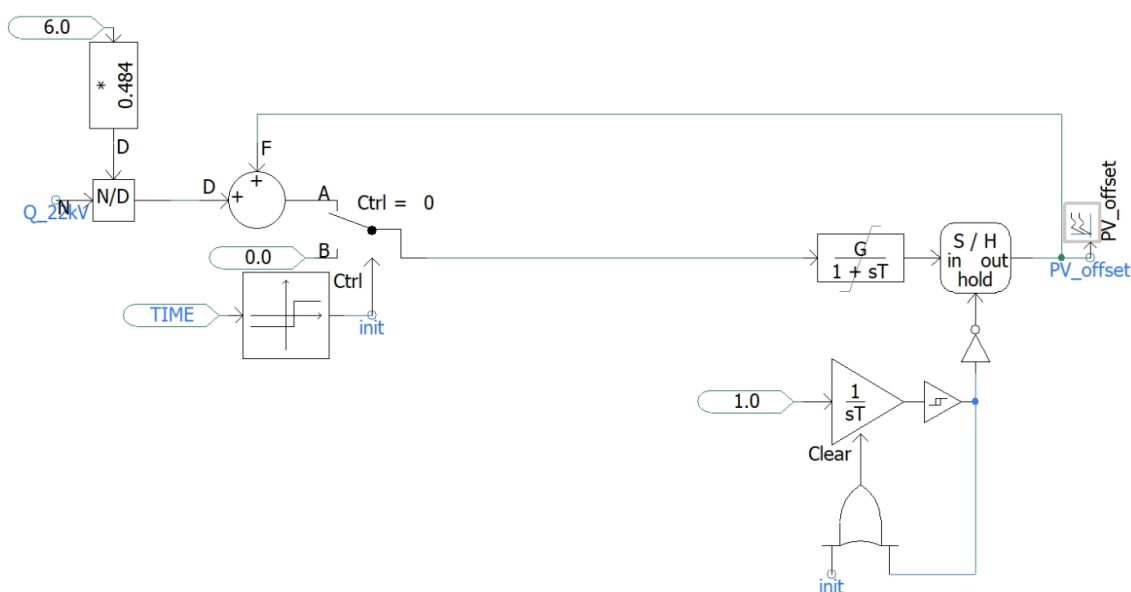
V rámci pozice 3 je z důvodu nižšího výkonu výrobný (tedy relativně menšího vlivu na přetok  $Q$ ) možné a z důvodu většího rozptylu napětí při méně a více zatíženém vývodu nutné eliminovat co nejvíce vliv výroby i z důvodu omezení změn napětí při změně velikosti výroby, příp. zátěže. Proto bude dle obr. 7.9 pro pozici 3 vybrána var. v13.

## 8.2 Simulace dispečerského řízení

Protože není známa metodika rozdělování jalového výkonu dle DŘ, byl navržen algoritmus dle obr. 8.1. Jedná se o zpracování informace o přetoku jalového výkonu přes transformátor, který je následně normalizován dle maximálního dostupného

jalového výkonu obou výroben. Součet aktuálně nastaveného kompenzačního výkonu se sečte s normalizovaným přetokem a po vyhlazení přenosovou funkcí s limitací  $\langle -1; 1 \rangle$  předá výrobně na port „offset“ signálu pro modul dle kap. 5.7.1. V rámci inicializace je DŘ blokováno.

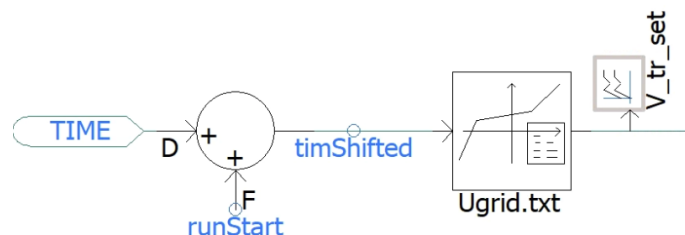
Algoritmus nastavuje novou hodnotu kompenzačního výkonu  $1 \times$  za 3 min. Do bloku hystereze je tedy nastavena hodnota horního limitu:  $3 \cdot 60/20 = 9$  s. Spodní limit hystereze je 0. Po uplynutí doby je na 1 krok simulace umožněno bloku SaH načtení nové informace a zároveň je proveden reset integrátoru. Od dalšího kroku simulace načítá integrátor znovu od 0.



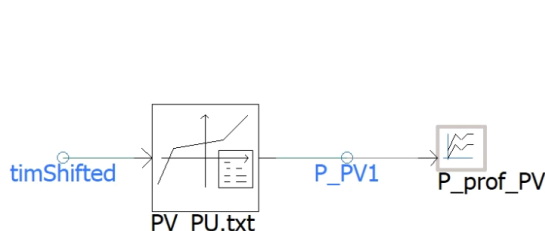
Obr. 8.1: Výpočet nastavení kompenzačního výkonu dle DŘ

## 8.3 Parametrizace

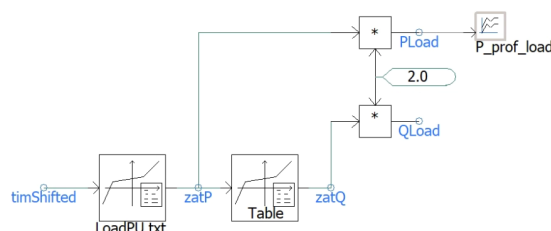
Charakteristiky představené v kap. 6 jsou do příslušných signálů předávány na základě času simulace pomocí vyhledávací tabulky. Charakteristiky byly ale vytvořeny pro celý průběh 24 h. Je nutné při stratu simulace rovněž začít číst charakteristiky od nastaveného času startu simulace dle rov. (8.2a) – čas startu je přičítám k času simulace dle obr. 8.2. Tento čas je dále zadáván do vstupního signálu vyhledávacích tabulek při parametrizaci výkonu zátěží (obr. 8.4) a výkonu FVE (obr. 8.3, signál je vstupní veličinou pro port žádaného výkonu). Dle obr. 8.4 je také dodatečně počítán jalový výkon dle výkonové křivky na obr. 1.3.



Obr. 8.2: Parametrizace napětí hladiny 110 kV při denní simulaci



Obr. 8.3: Parametrizace výkonu FVE při denní simulaci



Obr. 8.4: Parametrizace výkonu zátěže při denní simulaci

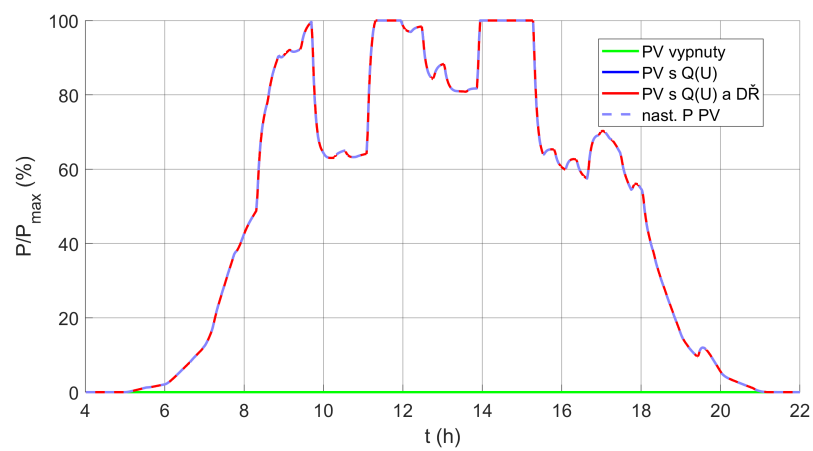
## 8.4 Zhodnocení výsledků

V následujícím textu jsou zhodnoceny grafické výsledky zpracované pomocí programu MATLAB.

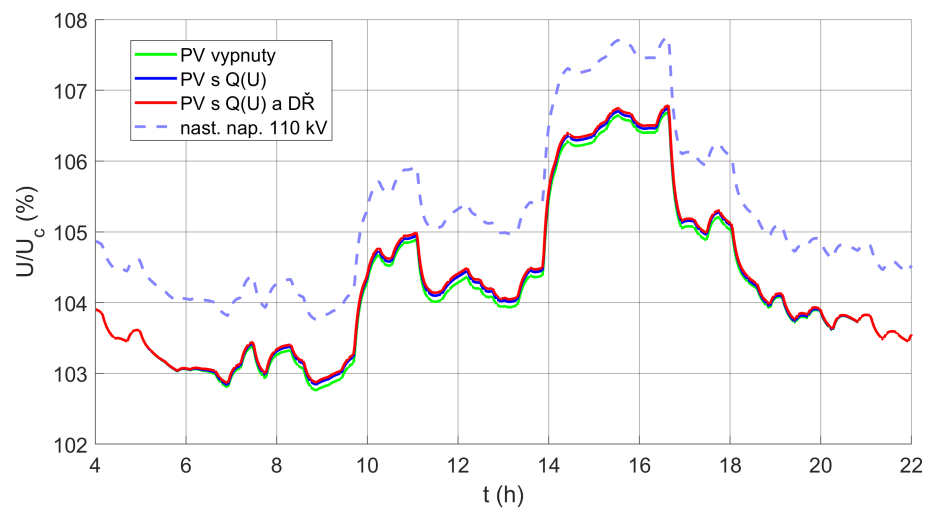
Při žádné ze simulací nebyl omezen výkon výroby pomocí funkce  $P(U)$ , průběh dodávaného výkonu výrobny včetně zadávaného profilu je na obr. 8.5 – pro obě výroby byla tato závislost shodná, je přiložena jen 1.

Jak je vidět z obr. 8.7, odchylka způsobená odchylkou napětí v místě připojení odběru byla v některých přípojných místech i významná. Nejvýraznější absolutní odchylka byla 10,23 % a nastala na zátěžích v pozicích 3 a 6 (tedy nejvzdálenější od transformátoru) při provozu bez připojených výroben (obr. 8.7a). Odchylka od nastavené hodnoty výkonu odpovídá modelu dle kap. 6.4 a nastaveným citlivostním koeficientům pro napětí. Zatížení ale kopírovala nastavený profil správně ve všech případech.

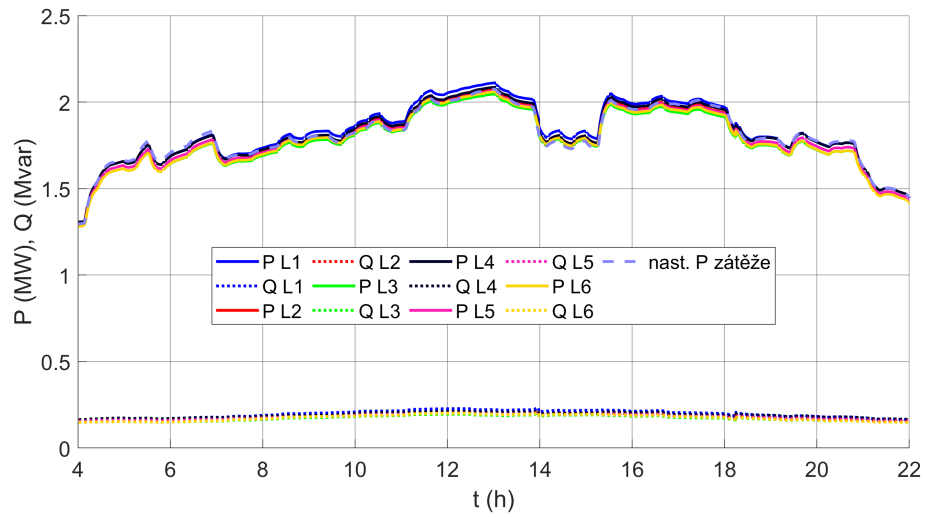
Na obr. 8.6 je zobrazen profil napětí pro jednotlivé simulace včetně nastaveného profilu. Je zde vidět úbytek napětí způsobený impedancí napáječe i místo rozestupu charakteristik jednotlivých simulací značící snížení toku výkonu z vyšší napěťové hladiny do nižší z důvodu výroby FVE a tedy snížení úbytku. Nejvyšší úbytek nastal při simulaci bez aktivovaných výroben – zde je nutné hradit z vyšší soustavy celou dobu celý odběr i ztráty. Nejnižší úbytek nastal při provozu s DŘ eliminujícím tok  $Q$  mezi soustavami a tedy snížení proudu procházejícího impedancí napáječe.



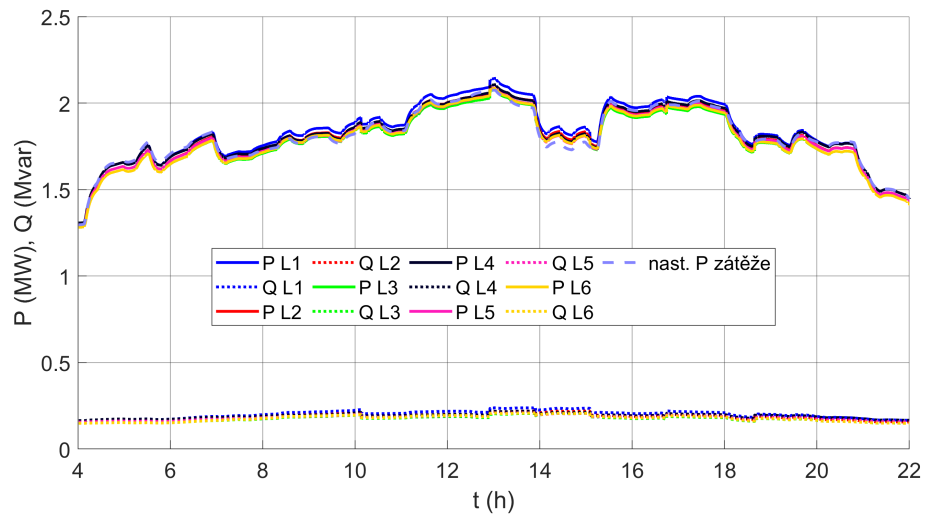
Obr. 8.5: Průběh dodávky výkonu PV1 i PV2



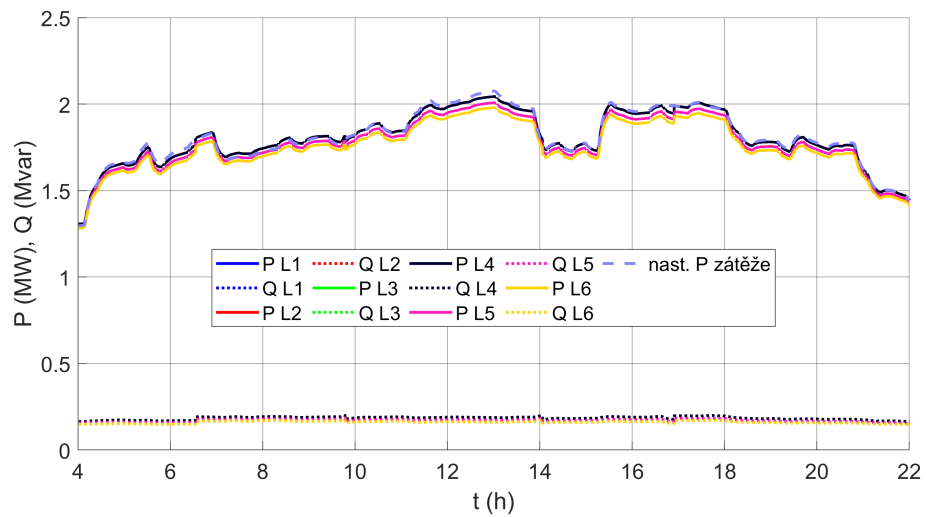
Obr. 8.6: Napětí na primární straně transformátoru a nastavený profil napětí



(a) FVE deaktivované



(b) FVE s  $Q(U)$



(c) FVE s  $Q(U)$  a DŘ

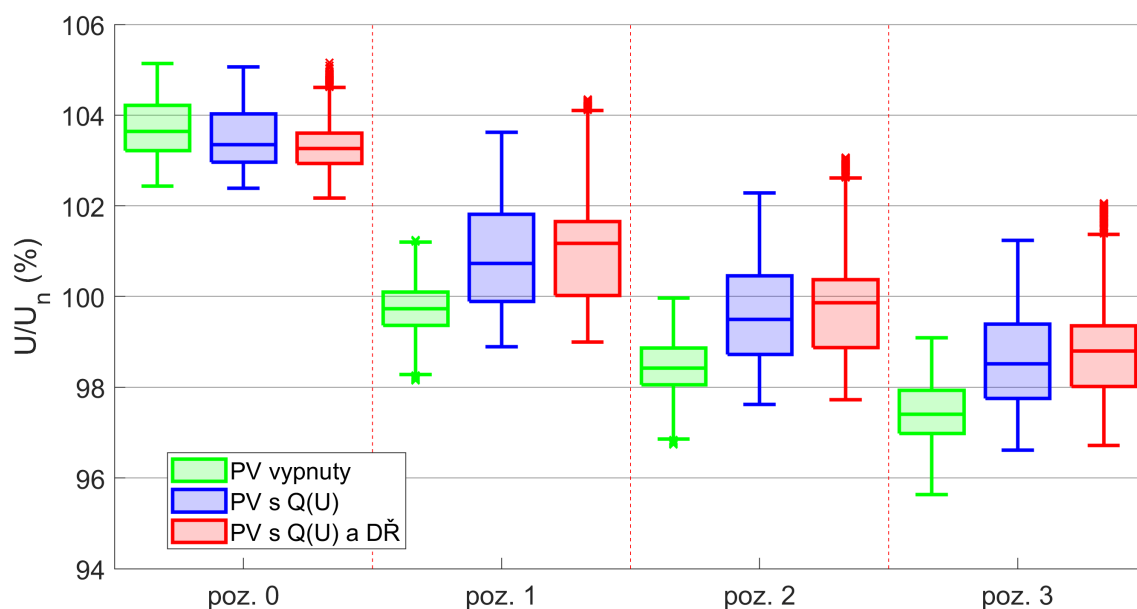
Obr. 8.7: Odebíraný činný a jalový výkon zátěží

### 8.4.1 Zhodnocení napětí v soustavě

Pro zhodnocení napětí z hlediska statistického rozložení hodnot v průběhu simulace byl zvolen krabicový graf. „Krabicová“ část diagramu značí rozpětí dat mezi 1. a 3. kvartilem, vousy reprezentují nejnižší údaj 1,5násobku mezikvartilového rozpětí (IQR) 1. kvartilu a nejvyšší údaj 1,5násobku IQR 4. kvartilu. Uvnitř „krabice“ je zvýrazněn medián.

Jak je možné vidět na obr. 8.8 (výrobna na poz. 1), v případě vývodu 1 způsobilo připojení výrobní s  $Q(U)$  zvýšení napětí a rovněž větší rozptyl hodnot napětí. Medián napětí se ale i ve vzdálenějších uzlech zvýšil. Vyšší hodnoty napětí lze přisoudit připojení výrobní, zatímco větší rozptyl napětí je způsoben proměnlivostí výroby. Jak bylo rozebráno i dříve, na úrovni 22 kV je vliv činného výkonu na napětí výrazný.

Aktivace DŘ u výrobní vývodu 1 sice způsobila zmenšení IQR ve všech místech připojení, ale rovněž přispěla k napěťovým špičkám ve všech místech připojení.



Obr. 8.8: Napětí na vývodu 1 při simulaci dne

V případě vývodu 2 dle obr. 8.9 byla situace podobná. Výrobna jen v tomto případě připojena do poz. 6 a má poloviční disponibilní výkon. Výrobna připojením opět způsobila zvýšení napětí i rozptylu v PM. Ale v místech blíže tvrdému zdroji – transformátoru a síti vyššího napětí lze pozorovat snížení rozptylu hodnot napětí.

Také u výrobní na vývodu 2 přispěla aktivace DŘ k zmenšení IQR, ale objevily se napěťové špičky vyšší než konec vousů pro simulace bez DŘ.

V tab. 8.2 jsou vypsané statistické informace k obr. 8.8 a 8.9.

Jak je vidět z obr. 8.8 a 8.9 a z tab. 8.2, dispečerské řízení přispělo v místech

připojení výroben k mírnému zmenčení IQR, ale ke zvětšení celkového rozsahu měřených napětí.

Tab. 8.2: Statistické hodnoty z rozložení napětí dle krabicového grafu

simulace	poz.	IQR			vousy	
		min (%)	medián (%)	max (%)	min (%)	max (%)
PV vyp.	0	103,2	103,6	104,2	102,4	105,1
	1	99,37	99,73	100,1	98,28	101,2
	6	96,98	97,41	97,93	95,63	99,09
PV s $Q(U)$	0	103	103,3	104	102,4	105,1
	1	99,69	100,2	100,9	98,87	102,3
	6	97,75	98,51	99,39	96,62	101,2
PV s $Q(U)$ a DŘ	0	102,9	103,3	103,6	102,2	104,6
	1	99,77	100,2	100,8	98,94	102,4
	6	98,01	98,80	99,36	96,72	101,4

### Časový průběh napětí

Na obr. 8.10 je vidět profil přepínače odboček s profilem nastaveného napětí na hladině 110 kV.

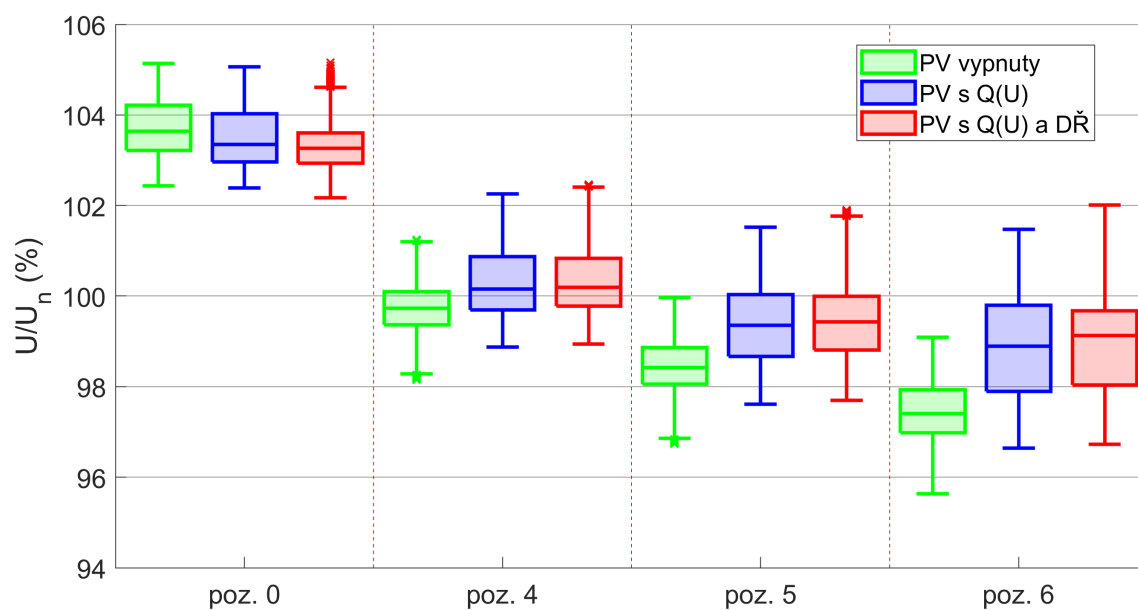
V případě provozu bez zátěže je zde vidět přepnutí způsobené poklesem napětí zvýšeným úbytkem bez výroby FVE. Toto je vidět jak na obr. 8.6, kde má nejvyšší úbytek právě tento průběh, tak na obr. 8.11 na grafu zobrazující napětí na poz. 0, kde se právě v době přepnutí nadále snižovalo.

Nejoptimálnější provoz z hlediska přepínače odboček měla simulace bez DŘ, kdy došlo k přepnutí pouze 2×.

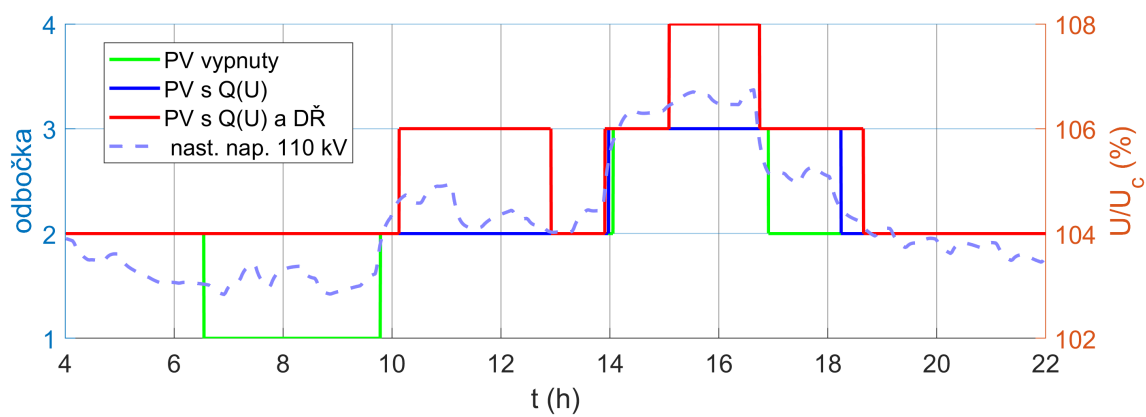
Naopak DŘ způsobilo přepnutí odbočky 6× za dobu simulace. Tyto napěťové špičky jsou vyobrazené jak na obr. 8.8, tak na obr. 8.11.

Obr. 8.11 zobrazuje časové průběhy napětí ve všech místech soustavy při jednotlivých simulacích. Je zde vidět výrazný vliv decentrální výroby na napětí v síti. V úsecích snížení výroby dle obr. 8.5 lze také vidět výrazné poklesy napětí. Lze vidět také zvětšení rozptylu hodnot napětí v celé síti při simulaci výroben s dispečerským řízením s tímto agresivním algoritmem.

Rychlé napěťové změny v charakteristikách na obr. 8.11 také označují okamžiky, kdy došlo k přepnutí odbočky.

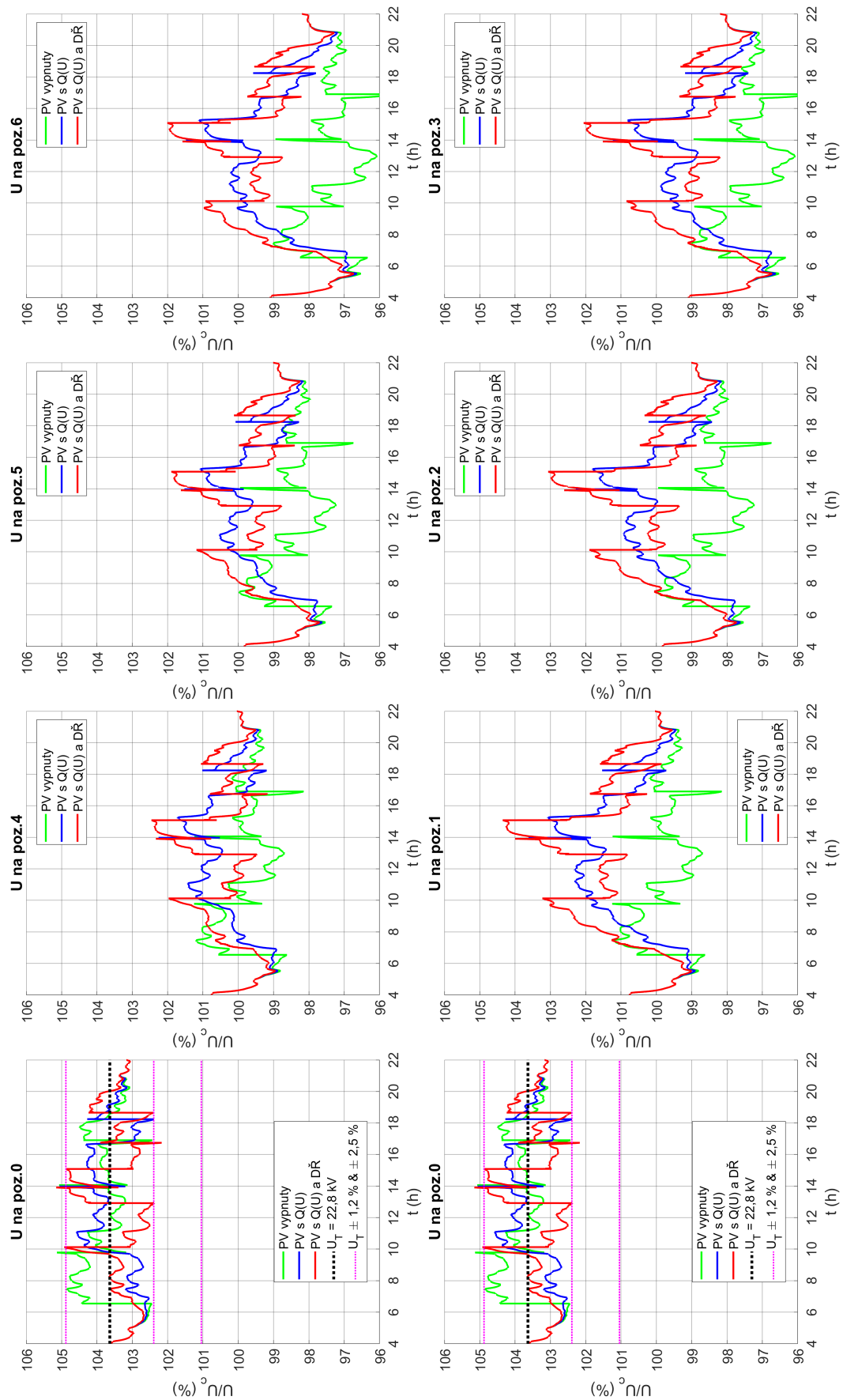


Obr. 8.9: Napětí na vývodu 2 při simulaci dne



Obr. 8.10: Průběh nastavených odboček transformátoru a napětí na hladině 110 kV





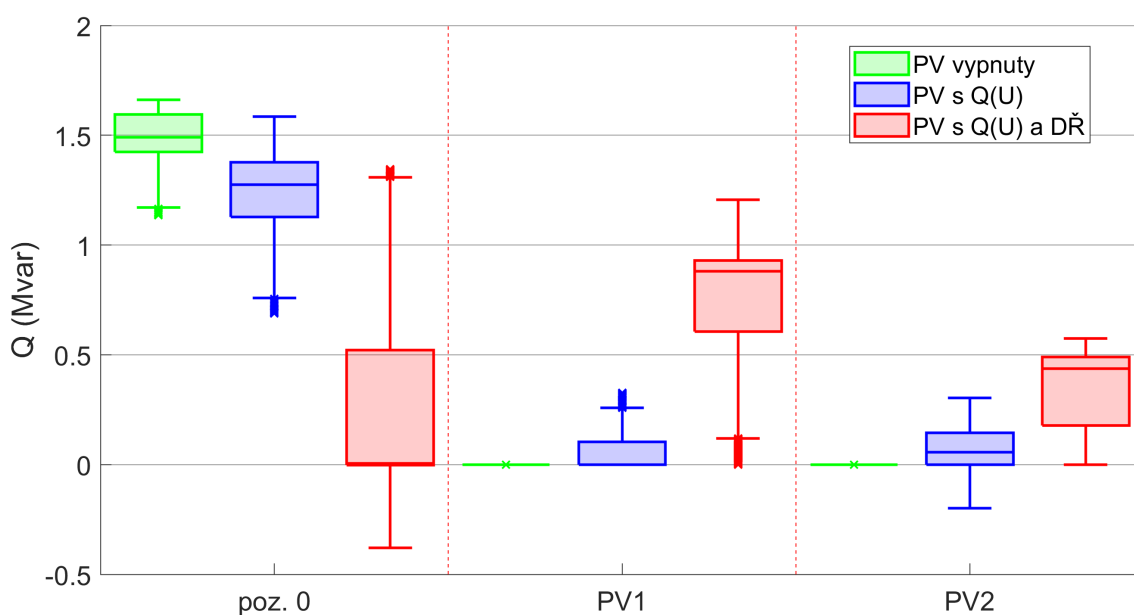
Obr. 8.11: Průběh napětí v místech měření při simulaci dne s různými nastaveními FVE; PV1 (4 MW) na poz. 1, PV2 (2 MW) na poz.6

## 8.4.2 Zhodnocení dle jalového výkonu

Na obr. 8.12 je vyobrazen statisticky zpracovaný tok jalového výkonu z hladiny 110 kV do hladiny 22 kV. Dále zde jsou vyobrazeny statisticky zpracované dodávky jalového výkonu obou výroben do soustavy.

V rámci toku přes transformátor je možné okamžitě vidět vliv připojených výroben, které způsobily pokles dodávky jalového výkonu z vyšší hladiny. Rovněž je zde vidět pokles toku přes transformátor při dispečerském řízení. Medián je v tomto případě na hodnotě 0,005 Mvar. Záporné hodnoty toku  $Q$  přes transformátor jsou způsobeny nastavováním  $Q$  výrobnám v rámci DŘ v okamžiku, kdy teprve dosahovaly 20 % výkonu a  $Q_{max}$  nebyl stabilní, což nebylo ve výpočtu nastavovaného kompenzačního výkonu reflektováno, viz. obr. 8.13. Dalším důvodem je také fakt zásahu samotné charakteristiky autonomního řízení v době 5 - 8 h, jak je zobrazeno na obr. 8.14

V rámci „krabic“ věnovaných na obr. 8.12 výrobnám je rovněž vidět u výroby PV1 pouze malá dodávka jalového výkonu do sítě při pouze autonomním řízení. Nastavená necitlivost další dodávky neumožnila. V případě DŘ byla dodávka způsobena nastavováním kompenzačním výkonem. Výrobna PV1 v rámci autonomního řízení byla nastavena bez pásma necitlivosti, dodávka do sítě byla v tomto případě vyšší. Rovněž při DŘ byla dodávka nastavována stejně jako v případě PV1.



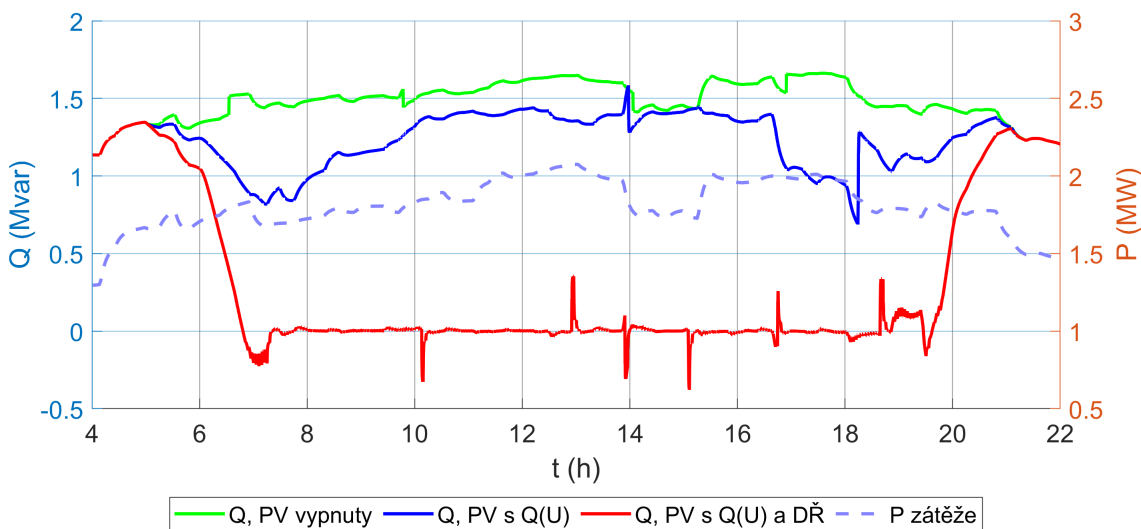
Obr. 8.12: Tok jalového výkonu přes transformátor do hladiny 22 kV a dodávka jalového výkonu výroben

## Časový průběh jalového výkonu

Obr. 8.13 zobrazuje průběh toku  $Q$  přes transf. z hladiny 110 kV do hladiny 22 kV. Při provozu bez výroben tento průběh přibližně kopíruje profil zadaného výkonu zátěží. Při aktivovaných výrobnách s pouze autonomním řízením lze rozeznat odklon od křivky bez výroben – tedy okamžiku, kdy výrobní začaly dodávat výkon do sítě. Dodávka do sítě se ale postupně se zvyšujícím se zatížením zvyšuje, výrobní přestávají dodávat jalový výkon nebo začínají odebírat dle obr. 8.14 a 8.16.

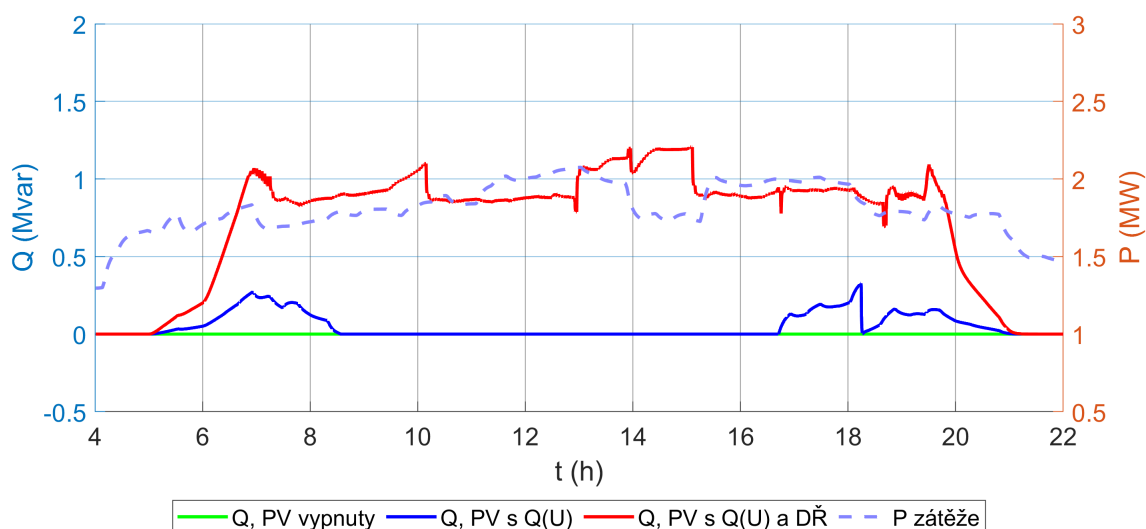
V charakteristikách se objevují také špičky dodávky nebo odběru jalového výkonu v okamžiku přepnutí odbočky a jejich směr je závislý na směru tohoto přepnutí.

Na obr. 8.15 a 8.17 je zobrazen dodávaný  $Q$  výrobními v p.j. Je z něj vidět, že výrobní ani při jednom ze způsobů nevypotřebovaly svůj regulační potenciál, ale i při dispečerském řízení dokázaly regulovat přetok přes transformátor prakticky na 0 s výjimkou okamžiků přepnutí odbočky nebo nedostatečné kapacity výroby jalového výkonu při snižování výroby činného výkonu, popř. je zde vidět i vliv zásahu výroben autonomním řízením, které způsobilo přetok do vyšší napěťové hladiny v okamžiku kolem 7 h. U výrobní PV2 je rovněž vzhledem k chybějícímu pásmu necitlivosti výraznější podpora napětí jalovým výkonem.

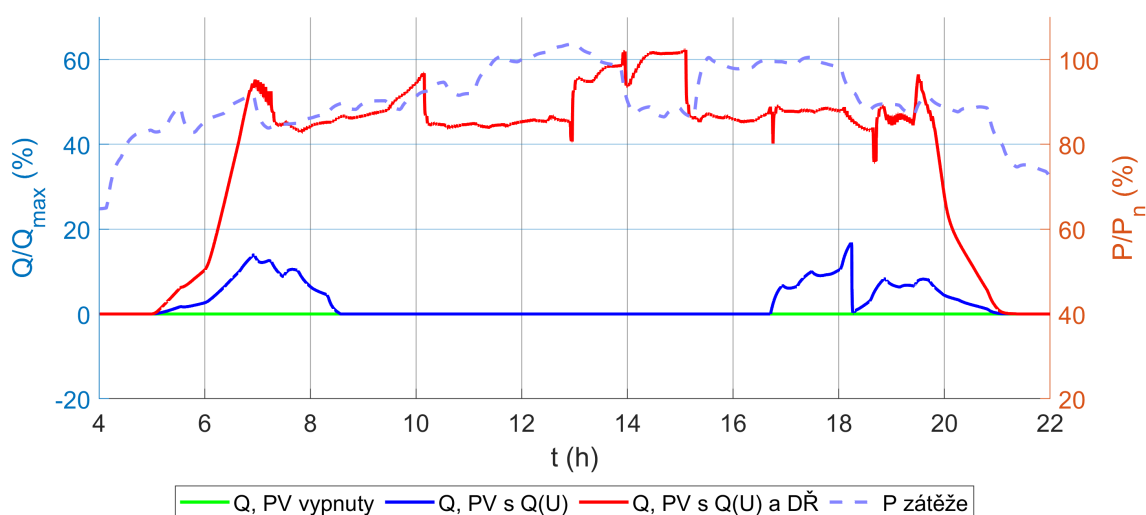


Obr. 8.13: Tok  $Q$  přes transf. z hladiny 110 kV do hladiny 22 kV s vyznačeným profilem zátěže

Na obr. 8.18 je zobrazena dodávka jalového výkonu do vývodu 1. Jsou zde vidět poklesy nutnosti dodávky jalového výkonu v době trvání výroby  $Q$  výrobní PV1. Rovněž je zde vidět také pokles dodávky  $Q$  i malý pokles oproti simulaci bez výroben v době, kdy výrobní sama jalový výkon aktivně nedodávala. V rámci dispečerského řízení byla z důvodu rozdělení výkonu hlavní výrobní  $Q$  právě PV1, což je vidět na výrazné dodávce  $Q$  směrem z vývodu 1 do vývodu 2.

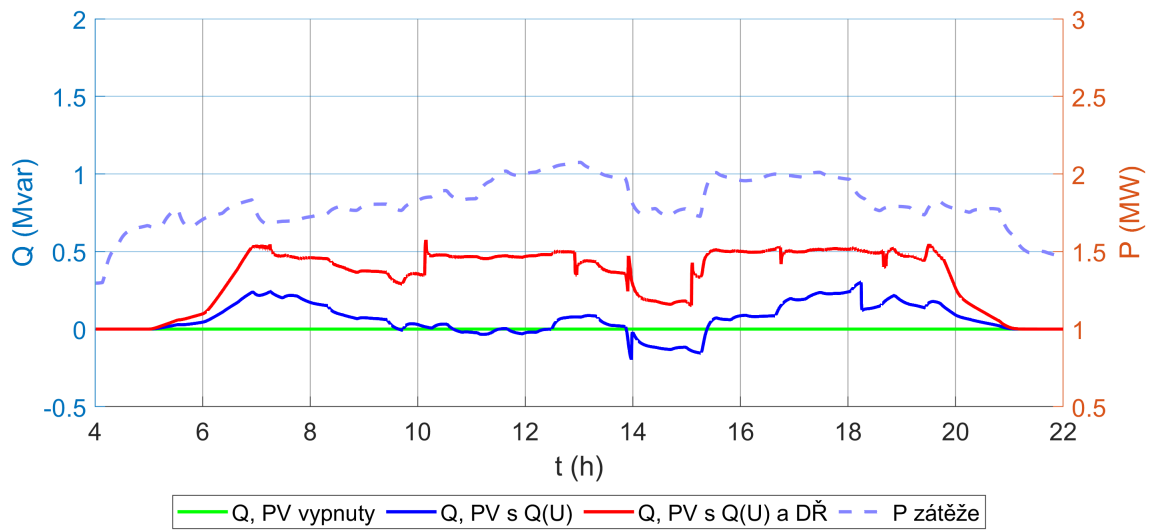


Obr. 8.14: Dodávka  $Q$  výrobnou PV1 s vyznačeným profilem zátěže

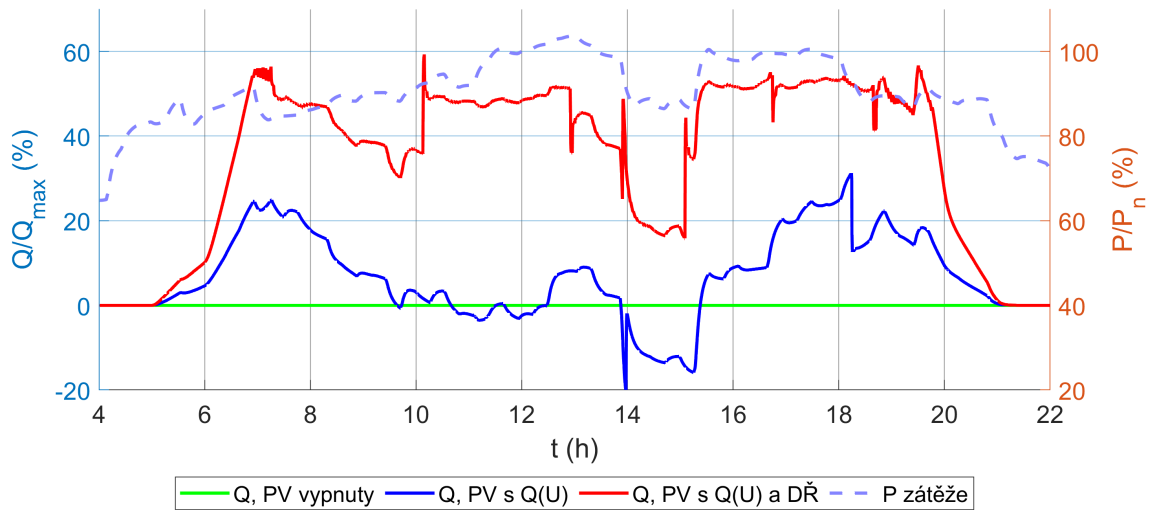


Obr. 8.15: Dodávka  $Q$  (p.j.) výrobnou PV1 s vyznačeným profilem zátěže

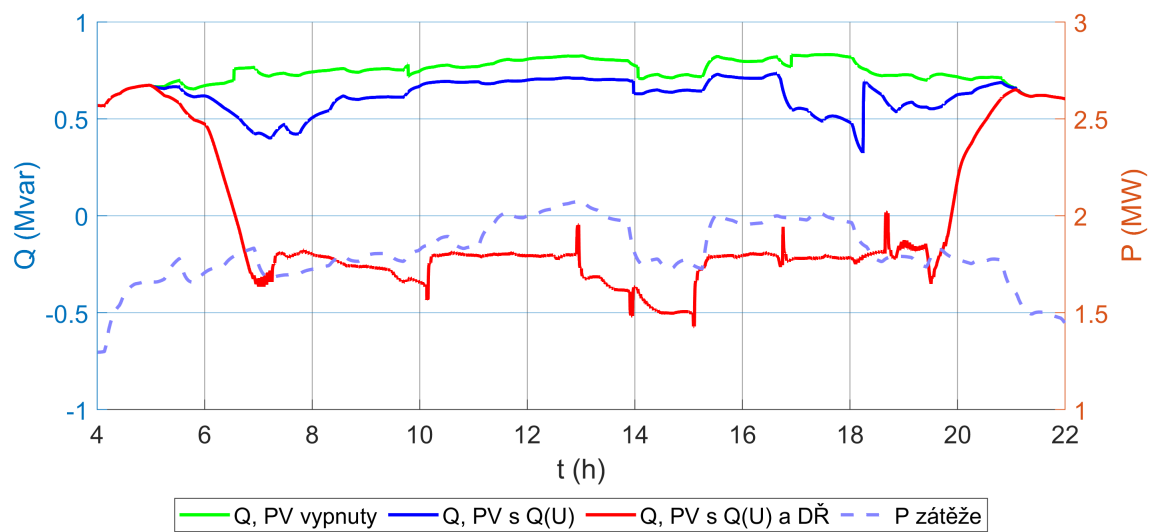
Obr. 8.19 zobrazuje dodávku  $Q$  do vývodu 2. I při nižším výkonu PV2 je vidět, že agresivnější řízení bez necitlivosti mělo při autonomním řízení velký vliv na dodávku  $Q$  do vývodu. V některých okamžicích byla nutnost dodávky dokonce vyšší než při provozu bez výroby. Při dispečerském řízení bylo z důvodu menšího výkonu vyráběno i menší množství  $Q$ . Snížení dodávky nebylo tak radikální, zbytek  $Q$  je hrazen výrobnou PV1.



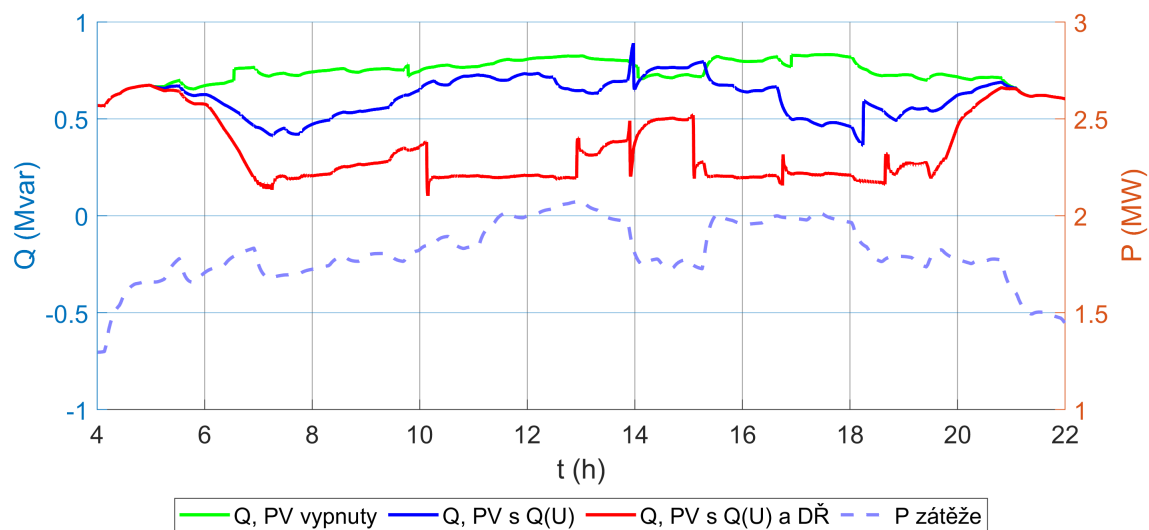
Obr. 8.16: Dodávka  $Q$  výrobnou PV2 s vyznačeným profilem zátěže



Obr. 8.17: Dodávka  $Q$  (p.j.) výrobnou PV2 s vyznačeným profilem zátěže



Obr. 8.18: Dodávka  $Q$  do vývodu 1



Obr. 8.19: Dodávka  $Q$  do vývodu 2

### 8.4.3 Zhodnocení dle ztrát v soustavě

Obr. 8.20 vyjadřuje jak statistické rozložení ztrát na obou vývodech (bez ztrát na transformátoru a impedanci napáječe), tak váženou průměrnou hodnotu ztrát určenou dle rovnice (8.3). Okamžité ztráty jsou vypočteny dle rovnice (8.4).

$$\Delta P = \frac{1}{t_{sim}} \int_0^{t_{sim}} \Delta p(t) dt \quad [W; s, s, W] \quad (8.3)$$

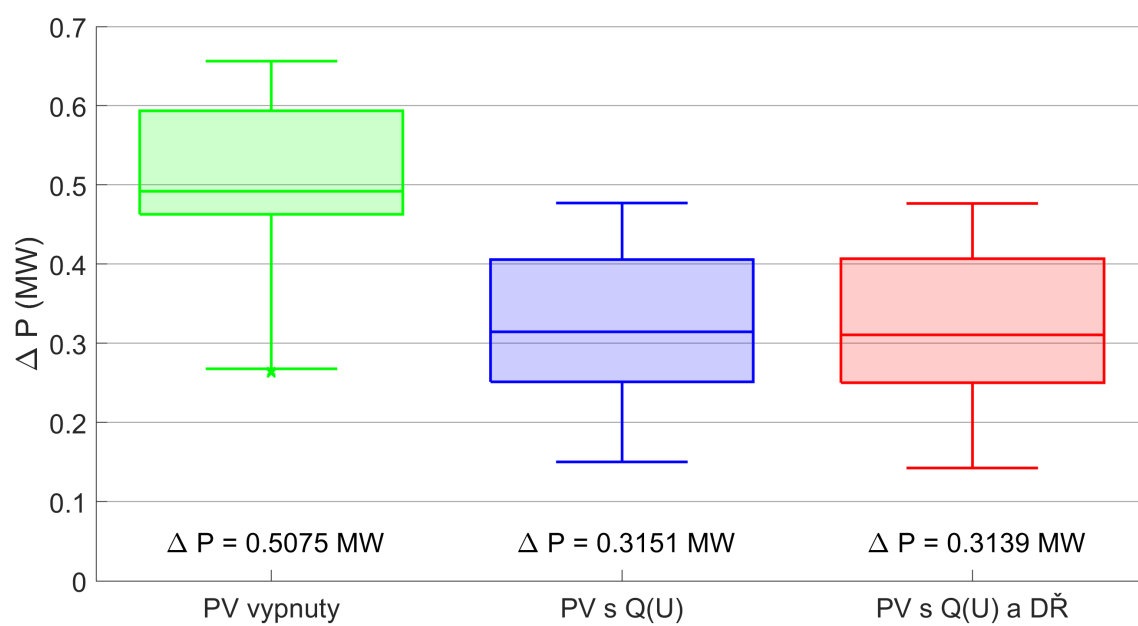
kde:  $\Delta P$  ... vážený průměr ztrát,  
 $\Delta p(t)$  ... okamžité ztráty v síti.

$$\Delta p(t) = p_{tr}(t) + p_{PV1}(t) + p_{PV2}(t) - \sum_{k=1}^6 p_{Lk}(t) \quad [W; W, W, W, W] \quad (8.4)$$

kde:  $p_{tr}(t)$  ... okamžitý výkon dodávaný transformátorem měřený na hladině 22 kV,  
 $p_{PV1}(t), p_{PV2}(t)$  ... okamžitý výkon dodávaný výrobkami PV1 a PV2,  
 $p_{Lk}(t)$  ... okamžitý výkon odebíraný zátěží k.

Ačkoliv z hlediska ztrát má připojení decentrálních výroben velký vliv na ztráty (což bylo zjištěno již při simulacích UCH), zařazení distribučního řízení mělo na ztráty v DS jen malý dopad. hlavní dopad toto bude mít na ztráty na hladině 110 kV, odkud nemusí být tento výkon dodáván. Na hladině 22 kV je tento  $Q$  spotřebován bez ohledu na původ. Tedy hlavním dopadem omezení přetoku  $Q$  přes transformátor je snížení přenosových ztrát na hladině napájecí napětové hladiny (v tomto případě 110 kV).

Dopad omezení přenášeného proudu při omezení přetoku  $Q$  na snížení úbytku napětí lze vidět na obr. 8.6.



Obr. 8.20: Ztráty činného výkonu na obou vývodech při různých nastavení řízení



## 9 Zhodnocení možností řízení

Z hlediska řízení jalového výkonu s kombinací dispečerského a autonomního řízení vycházejí v zásadě 2 varianty:

1. řízení na zadané napětí v definovaném místě v síti,
2. řízení  $Q$  pouze jako podporu udržení napětí v dovolených mezích – ( $Q(U)$ ).

V rámci řízení na zadané napětí ale při nízké citlivosti sítě  $\frac{\partial Q}{\partial U}$  a v elektrické blízkosti transformátoru z vyšší nap. hladiny může dojít k vyčerpání možnosti podpory i při malé změně napětí, což může vést k dalšími zhoršováním napěťových poměrů v síti bez možnosti dodatečné podpory. Rovněž toto velké množství jalového výkonu může způsobit nevhodné přetoky  $Q$  mezi hladinami a také výrazně zvýšené ztráty. Při provozu výrobní elektricky vzdálenější již nebyl nárůst ztrát tak vysoký – částečnou příčinou může být i snížení výkonu výrobní, využitý regulační potenciál i pro udržení napětí na  $U_c$  se se vzrůstající vzdáleností navyšoval.

V rámci řízení dle  $Q(U)$  byl rovněž vidět efekt podpory napětí při srovnání s provozem FVE bez regulace, ačkoli z principu nebyl tak výrazný jako při regulaci na zadané napětí. Nicméně podpora může být na základě konkrétních provozních požadavků v místě implementace podrobněji specifikována a uzpůsobena.

Pro elektricky bližší výrobní je z hlediska možností podpory napětí volit charakteristiku s necitlivostí s žádaným napětím v rozsahu 22,0 – 22,8 kV, z důvodu zvýšení napětí výrobou je dle možnosti podpory při dispečerském řízení vhodnější volit žádané napětí vyšší – tato volba ale záleží na konkrétních podmínkách v místě připojení a na strategii řízení sítě. Charakteristiky bez necitlivosti poskytovaly lepší možnosti udržení napětí, ale také výrazné zvýšení toku  $Q$  přes transformátor. Zvýšení napětí ale v případě elektricky blízké výrobní správně zvoleného výkonu není výrazné.

V případě elektricky vzdálenější výrobní je možné využít sníženého pásma necitlivosti  $Q(U)$  pro nápravu parametrů napětí, protože ačkoliv je výrobní menšího výkonu, rozptýl napětí dodávkou je vyšší než u elektricky blízké výrobní a náprava parametrů napětí je více nutná.

Možnosti dispečerského řízení jsou pro ovlivnění toku  $Q$  značné. Výrobou  $Q$  přímo na hladině spotřeby, případě blíže spotřebě se eliminuje nutnost přenosu dodatečného výkonu. Tato možnost byla ověřena simulací celého dne. Eliminace ztrát se ale děje na hladině, z níž by byla jalová energie dodávána.

Ověření snižování činného výkonu s využitím funkce  $P(U)$  nebylo simulací ověřováno. Doporučení zůstávají stávající dle rozboru v kap. 6.5.1.

# Závěr

První část práce se zabývá rozбором situace distribuční soustavy v rámci České republiky. Je zde jak rozebrán charakter prvků sítě, tak současná koncepce regulace napětí v soustavě i současná situace zdrojů připojovaných do hladiny vysokého napětí dle nynější legislativy.

Další část práce zahrnuje rešerši v současnosti umožňovaných možností, jak zajistit autonomní řízení na úrovni DS. Toto zahrnuje evropskou legislativu představovanou směrnicí RfG definující pouze obecné požadavky, dále normativní předpis ČSN EN 50549-2 konkretizující předpis směrnici RfG pro přímé použití v soustavě a také českou implementaci PPDS, přílohu 4, která implementuje tato nařízení, upřesňuje a doplňuje jednotlivé požadavky pro zahrnutí specifík české distribuční soustavy. Dále tato část práce obsahuje dodatečný rozbor vhodnosti řízení na základě možností definovaných v podkladových dokumentech. Rozbor možností autonomního řízení zakončuje rozbor požadavků PDS EG.D a ČEZ Distribuce, kteří své požadavky zveřejnili.

Poslední částí teoretického rozboru jsou současné požadavky a infrastruktura dispečerského řízení PDS EG.D a ČEZ Distribuce, kteří parametry svého dispečerského řízení mají zveřejněny. Rovněž je v této části rozebrána možnost kombinace autonomního a dispečerského řízení úpravou řídicí  $Q(U)$  charakteristiky volbou žádaného napětí a kompenzačního výkonu.

Praktická část práce začíná popisem metodiky simulace výroby v prostředí PSCAD s možností parametrizace hlavních řídicích charakteristik činného a jalového výkonu na základě frekvence i napětí. Model je rovněž schopen dynamicky regulovat na zadané hodnoty na základě zpětné vazby z měření v místě připojení.

Poté následuje rozbor modelu sítě s popisem vytvořených modulů na základě rešerše v první části této práce. Nachází se zde také konkrétní nastavené parametry jednotlivých prvků jak pro UCH, tak pro simulaci části dne. Prvky, u kterých je to žádoucí jsou také schopny dynamicky reagovat na události v místě připojení a upravovat své parametry tak, aby se simulace chovala předvídatelně a v rámci nastavených parametrů.

Rozbor simulování UCH začíná metodou simulace, kde jsou popsány prvky využívané při simulaci scénářů. Dále následuje zpracování a zhodnocení výsledků. Výsledky jsou hodnoceny z hlediska jak napěťových poměrů při jednotlivých scénářích, tak z hlediska toků jalového výkonu a ztrát. K omezení činného výkonu výroben při zvolených výkonech nedošlo. Z tohoto rozboru jsou vybrány nastavení charakteristik blízké a vzdálené výroby pro simulaci části dne.

Popis metody simulace části dne je uveden rozбором použitých profilů napětí soustavy, disponibilního výkonu výroben a profilu zátěží. Následně je vysvětlen kon-

cept regulace přetoku  $Q$  přes transformátor pro simulaci DŘ. Simulace je hodnocena jak ze statistického, tak z časového pohledu na napětí v soustavě, toky jalového výkonu, i ztráty.

Výsledné zhodnocení možností řízení na základě provedených simulace je uvedeno v kap. 9.

Vytvořený model výroby i sítě lze libovolně parametrizovat a provést dodatečné simulace, např. s vyšším výkonem výroben, doplnění dalších výroben do jednotlivých vývodů či přidání dalšího vývodu a ověřit tak další řídicí charakteristiky nebo odlišná nastavení. Model je připraven rovněž na simulaci soustavy ve stavu, kdy frekvence není stabilní.

Na základě výsledků simulací lze rovněž poukázat na přínosný vliv autonomní regulace na napětí v místech připojení výroben a na celkové snížení ztrát přenosem výkonu na kratší vzdálenosti. Dispečerské řízení, které je schopné na základě výsledků simulace schopné plné koexistence s autonomními způsoby řízení, je schopné také reagovat na základě požadavku a přispívat k celkové stabilitě soustavy.

# Literatura

- [1] *Pravidla provozování distribučních soustav - příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy*. Energetický regulační úřad, 2020. Dostupné také z: [https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2020\\_priloha-4.pdf](https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/ppds/ppds-2020_priloha-4.pdf)
- [2] *ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ES ČR 2013* [online]. Praha: Energetický regulační úřad, 2014 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9](https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2013.pdf/20c3f587-a658-49f7-ace9-56be8a66b7b9)
- [3] *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2019* [online]. Energetický regulační úřad, 2020 [cit. 2020-12-20]. Dostupné z: [https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni\\_zprava\\_provoz\\_ES\\_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc](https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc)
- [4] Rozvoj distribuční soustavy. *ČEZ Distribuce* [online]. [cit. 2021-01-22]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/rozvoj-distribucni-soustavy-1>
- [5] NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2016/631 ze dne 14. dubna 2016, kterým se stanoví kodex sítě pro požadavky na připojení výroben k elektrizační soustavě (RfG)
- [6] *Rozhodnutí Energetického regulačního úřadu*. Jihlava, 2017, Sp. zn. SLS07261/2017-ERU.
- [7] ČSN EN 50549-2. *Požadavky na paralelně připojené výrobní s distribučními sítěmi - Část 2: Připojení k distribuční síti středního napětí - Výrobní do typu B a včetně*. 2019.
- [8] Drápela, Jiří a kol. *Autonomní řízení a regulace FV výroben v podmínkách VN*, Studie č. 118/010920, v2 (18. 1. 2021), 124 stran
- [9] Vyhláška č. 79/2010 Sb., o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení
- [10] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. : il. ISBN 978-80-01-04935-8.

- [11] *POPIS DISTRIBUČNÍ SOUSTAVY EG.D, a.s.* [online]. EG.D, 2020 [cit. 2021-4-23]. Dostupné z: [https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-08/332\\_Popis\\_DS\\_elektro\\_2020.pdf](https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-08/332_Popis_DS_elektro_2020.pdf)
- [12] *Technická data: Přehled základních technických informací ČEZ Distribuce, a.s., k 31. 12. 2020* [online]. ČEZ Distribuce [cit. 2021-3-20]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/cs/distribucni-soustava/technicka-data>
- [13] EGÚ BRNO. *Katalog typových prvků a parametrů el. sítí. Program GLF/AES.* 2003.
- [14] FEKT. *Řízení elektrizačních soustav: přednáška 6. Regulace napětí a jalových výkonů.*
- [15] FEKT. *Městské a průmyslové sítě: 4. přednáška, Regulace napětí v DS.*
- [16] KRUTIŠ, Petr. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z transformovny Čebín.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 74 listů.
- [17] KLOBUČNÍK, Jozef. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON při mŕstkovém provozu transformátorů T401 a T402 v transformovně 400/110 kV Čebín.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014, 79 listů.
- [18] KUBA, Petr. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z rozvodny 110 kV Otrokovice v roce 2012.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012.
- [19] VYČÍTAL, Václav. *Ustálený chod a zkratové poměry v síti 110 kV E.ON napájené z transformovny Sokolnice.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015, 114 listů : obrázky, grafy, tabulky + 1 CD-ROM.
- [20] *Informace o materiálech* [online]. ČEZ Distribuce [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://material.cezdistribuce.cz/webshop/default.aspx>
- [21] KULIŠ, Jakub. *Analýza zatížení a regulačních možností distribučních transformátorů.* 2013. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/10098>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [22] ČSN EN 50160: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.* Ed. 3. 2011.

- [23] SKOUPÝ, Martin. *Automatická regulace napětí decentrálních zdrojů v síti vysokého napětí E.ON*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, 81 listů : ilustrace + 1 CD-ROM.
- [24] MUCHNA, Petr. *Volba optimálního převodu transformátorů VN/NN a napěťové hladiny regulátoru transformátorů 110 kV/VN*. 2018. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/11025/31560>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [25] *Management Q: Executive summary* [online]. EGÚ Brno, 2019 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/10/Management\\_Q\\_Executive\\_Summary\\_1.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2019/10/Management_Q_Executive_Summary_1.pdf)
- [26] *Potřebnost zdrojů jalového výkonu pro řízení U/Q v ES ČR do roku 2030 — Etapa 1: Summary* [online]. EGÚ Brno, 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2020/10/Summary\\_Potrebnost-zdroju-jaloveho-vykonu-pro-řízení-U-Q.pdf](https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2020/10/Summary_Potrebnost-zdroju-jaloveho-vykonu-pro-řízení-U-Q.pdf)
- [27] *Připojovací podmínky pro výrobní elektrárny* [online]. ČEZ Distribuce, 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/pripojovacicpodminkyvyrobnny.pdf>
- [28] *REG-D Relay for Voltage Control & Transformer Monitoring: User Manual* [online]. a-eberle, 2016 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/01/Manual\\_REG\\_D\\_en\\_web\\_2016\\_07.pdf](https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/01/Manual_REG_D_en_web_2016_07.pdf)
- [29] *PSCAD* [online]. Manitoba Hydro International [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.pscad.com/>
- [30] *PSCAD: User Guide* [online]. Manitoba Hydro International [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.pscad.com/knowledge-base/download/psc\\_ad\\_manual\\_v4\\_6.pdf](https://www.pscad.com/knowledge-base/download/psc_ad_manual_v4_6.pdf)
- [31] KOZUBÍK, Michal. *Metody anti-windup při řízení lineárních dynamických systémů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017, 55 listů : ilustrace, 1 CD-ROM.
- [32] TOLEDO, Fabio. *Smart Metering Handbook*. 1991. ISBN 9781593702984.

- [33] ČSN EN ISO 80000-3: Veličiny a jednotky - Část 3: Prostor a čas. 2021.
- [34] AKAGI, Hirofumi, Edson Hirokazu WATANABE a Mauricio AREDES. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007. ISBN 9780470107614.
- [35] O'ROURKE, Colm J, Mohammad M QASIM, Matthew R OVERLIN a James L KIRTLEY. A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: dq0, Clarke, and Park. *IEEE transactions on energy conversion* [online]. IEEE, 2019, **34**(4), 2070-2083 [cit. 2021-5-23]. ISSN 0885-8969. Dostupné z: doi:10.1109/TEC.2019.2941175
- [36] *Provozní instrukce: Požadavky na zařízení a regulaci a ovládání výroben a na zařízení poskytující službu odezvy na straně poptávky připojovaných do distribuční soustavy ČEZ Distribuce, a.s.* [online]. ČEZ Distribuce, 2021 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.cezdistribuce.cz/webpublic/file/edee/distribuce/provozni-instrukce-regulace.pdf>
- [37] *Připojování decentralních zdrojů do distribučních sítí EG.D: nad 630 kVA* [online]. Brno: EG.D, 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-12/209\\_DRS\\_podklady\\_pro\\_pripojeni\\_zdroju\\_nad\\_630kVA\\_210101.pdf](https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-12/209_DRS_podklady_pro_pripojeni_zdroju_nad_630kVA_210101.pdf)
- [38] *Připojování decentralních zdrojů do distribučních sítí EG.D: do 630 kVA* [online]. Brno: EG.D, 2020 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: [https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-12/211\\_DRS\\_podklady\\_pro\\_pripojeni\\_zdroju\\_do\\_630kVA\\_210101.pdf](https://www.egd.cz/sites/default/files/2020-12/211_DRS_podklady_pro_pripojeni_zdroju_do_630kVA_210101.pdf)
- [39] VANĚK, Roman. *Regulace U/Q lokálních zdrojů v síti vn* [online]. ČEZ Distribuce, 2018 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/aktualni-informace/2018/9/CEZ-Distribuce----Regulace-lokalnich-zdroju-U-Q.pptx>
- [40] *Připojování a regulace obnovitelných zdrojů energie (OZE)* [online]. EG.D [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <https://www.egd.cz/pripojovani-regulace-obnovitelnych-zdroju-energie>
- [41] ČSN EN 60909-0: Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách - Část 0: Výpočet proudů. Ed.2. 2016.
- [42] Průběh výroby pro letní den. *Fotovoltaické elektrárny a fototermické systémy pro ohřev teplé vody* [online]. Baratech, 10. června 2014 [cit. 2021-5-23]. Dostupné z: <http://www.baratech.cz/downloads/vyroba-leto.jpg>

- [43] KUNDUR, Prabha. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994, grafy. ISBN 978-0-07-035958-1.
- [44] TANG, Xiaoqing, Kazi N HASAN, Jovica V MILANOVIC, Kieran BAILEY a Stephen J STOTT. Estimation and Validation of Characteristic Load Profile Through Smart Grid Trials in a Medium Voltage Distribution Network. *IEEE Transactions on Power Systems* [online]. IEEE, 2018, **33**(2), 1848-1859 [cit. 2021-5-23]. ISSN 0885-8950. Dostupné z: doi:10.1109/TPWRS.2017.2740563
- [45] Vyhláška o měření elektřiny. In: *Sbírka zákonů*. ročník 2020, číslo 359.



# Seznam příloh

A	Skript vyhledávací tabulky	165
B	Skript limitace nárůstu	167
C	Skript $Q(P)$ oblasti limitace jalového výkonu	168
D	Skript pro modul alternativního zadání $Q(U)$	173
E	Model soustavy v PSCADu	175
F	Obsah elektronické přílohy	176

# A Skript vyhledávací tabulky

Výpis A.1: Skript pro modul vyhledávací tabulky

```
1 #BEGIN
2   $OUT=0.0
3   ! inicializace pro t=0.0
4 #ENDBEGIN
5 #LOCAL REAL smer
6 #LOCAL INTEGER a
7 smer=0
8 a=0
9 ! set array podrobnosti:
10 ! 1      ... body
11 ! 2 - 6  ... hodnoty X
12 ! 7 - 11 ... hodnoty Y
13 ! body pod nejnizsim X a nad nejvyssim X budou extrapolovany
    podle charakteristiky predchozi sekce pokud out_val==1,
    jinak je drzena posledni hodnota
14
15 IF ($set(1) >= 2 .and. $IN <= $set(2)) THEN
16   ! pred nejnizsim X
17   a=1
18   ! smernice dilcich charakteristik mezi body
19   IF ($out_val == 1) THEN
20     smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
21   ELSE
22     smer = 0
23   ENDIF
24   ! samotna interpolace bodu charakteristiky
25   $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
26 ELSEIF ($set(1) >= 2 .and. $IN > $set(2) .and. $IN <=
    $set(3)) THEN
27   a=1
28   ! smernice dilcich charakteristik mezi body
29   smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
30   ! samotna interpolace bodu charakteristiky
31   $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
32 ELSEIF ($set(1) >= 3 .and. $IN > $set(3) .and. $IN <=
    $set(4)) THEN
33   a=2
34   ! smernice dilcich charakteristik mezi body
```

```

35     smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
36     ! samotna interpolace bodu charakteristiky
37     $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
38 ELSEIF ($set(1) >= 4 .and. $IN > $set(4) .and. $IN <=
    $set(5)) THEN
39     a=3
40     ! smernice dilcich charakteristik mezi body
41     smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
42     ! samotna interpolace bodu charakteristiky
43     $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
44 ELSEIF ($set(1) >= 5 .and. $IN > $set(5) .and. $IN <=
    $set(6)) THEN
45     a=4
46     ! smernice dilcich charakteristik mezi body
47     smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
48     ! samotna interpolace bodu charakteristiky
49     $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
50 ELSEIF ($set(1) >= 2 .and. $IN > $set(int($set(1)))) THEN
51     ! nad nejvyssim X
52     a=int($set(1))-1
53     ! smernice dilcich charakteristik mezi body+
54     IF ($out_val == 1) THEN
55         smer=($set(6+a+1)-$set(6+a))/($set(1+a+1)-$set(1+a))
56         ! samotna interpolace bodu charakteristiky
57         $OUT = $set(6+a) + ($IN - $set(1+a)) * smer
58     ELSE
59         smer = 0
60         $OUT = $set(6+a+1)
61     ENDIF
62 ELSE
63     $OUT = 0
64 ENDIF

```

## B Skript limitace nárůstu

```
1 #BEGIN
2   $OUT=0.0
3   ! inicializace pro t=0.0
4 #ENDBEGIN
5 #LOCAL REAL RATE, OUT_PREV, OUT_CALC
6 #STORAGE REAL:1
7 IF ($RESET) THEN
8   OUT_CALC = 0.0
9 ELSE
10  OUT_PREV = STORF(NSTORF)
11  RATE = ABS($IN-OUT_PREV)/DELT
12  IF (RATE > $SLOPE) THEN
13    IF ($IN > $OUT) THEN
14      OUT_CALC = OUT_PREV + DELT*$SLOPE
15    ELSE
16      OUT_CALC = OUT_PREV - DELT*$SLOPE
17    ENDIF
18  ELSE
19    OUT_CALC = $IN
20  ENDIF
21 ENDIF
22 $OUT = OUT_CALC
23 STORF(NSTORF) = OUT_CALC
24 NSTORF = NSTORF + 1
```

## C Skript $Q(P)$ oblasti limitace jalového výkonu

Výpis C.1: Skript pro modul Q(P) oblasti

```
1 #BEGIN
2   $Q=0.0
3   $limit=0.0
4   ! inicializace pro t=0.0
5 #ENDBEGIN
6 #LOCAL REAL Qlim, smer
7 #LOCAL INTEGER a
8
9 Qlim=0
10 smer=0
11 a=0
12 ! Q_req kladna je dodavka jaloviny, zaporna odber
13 ! za x pro smernici se povazuje P (p.u.)
14 !
15
16 IF ($QP_set(1) >= 2 .and. $P_out > $QP_set(2) .and. $P_out
    <= $QP_set(3)) THEN
17   a=1
18   IF ($Q_req > 0) THEN
19     ! smernice dilcich charakteristik mezi body
20     smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
21     ! samotna interpolace bodu charakteristiky
22     Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
23   ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
24     smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
25     Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
26   ELSE
27     Qlim = 0
28   ENDIF
29 ELSEIF ($QP_set(1)>=3 .and. $P_out > $QP_set(3) .and. $P_out
    <= $QP_set(4)) THEN
30   a=2
31   IF ($Q_req > 0) THEN
```

```

32     smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
33     Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
34 ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
35     smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
36     Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
37 ELSE
38     Qlim = 0
39 ENDIF
40 ELSEIF ($QP_set(1)>=4 .and. $P_out > $QP_set(4) .and. $P_out
    <= $QP_set(5)) THEN
41     a=3
42     IF ($Q_req > 0) THEN
43         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
44         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
45     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
46         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
47         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
48     ELSE
49         Qlim = 0
50     ENDIF
51 ELSEIF ($QP_set(1)>=5 .and. $P_out > $QP_set(5) .and. $P_out
    <= $QP_set(6)) THEN
52     a=4
53     IF ($Q_req > 0) THEN
54         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
55         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
56     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
57         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
58         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
59     ELSE
60         Qlim = 0
61     ENDIF
62 ELSEIF ($QP_set(1)>=6 .and. $P_out > $QP_set(6) .and. $P_out
    <= $QP_set(7)) THEN
63     a=5

```

```

64 IF ($Q_req > 0) THEN
65     smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
66     Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
67 ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
68     smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
        ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
69     Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
70 ELSE
71     Qlim = 0
72 ENDIF
73 ELSEIF ($QP_set(1)>=7 .and. $P_out > $QP_set(7) .and. $P_out
    <= $QP_set(8)) THEN
74     a=6
75     IF ($Q_req > 0) THEN
76         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
77         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
78     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
79         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
80         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
81     ELSE
82         Qlim = 0
83     ENDIF
84 ELSEIF ($QP_set(1)>=8 .and. $P_out > $QP_set(8) .and. $P_out
    <= $QP_set(9)) THEN
85     a=7
86     IF ($Q_req > 0) THEN
87         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
88         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
89     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
90         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
            ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
91         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
92     ELSE
93         Qlim = 0
94     ENDIF
95 ELSEIF ($QP_set(1)>=9 .and. $P_out > $QP_set(9) .and. $P_out
    <= $QP_set(10)) THEN

```

```

96     a=8
97     IF ($Q_req > 0) THEN
98         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
           ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
99         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
100     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
101         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
           ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
102         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
103     ELSE
104         Qlim = 0
105     ENDIF
106 ELSEIF ($QP_set(1)>=10 .and. $P_out > $QP_set(10) .and.
           $P_out <= $QP_set(11)) THEN
107     a=9
108     IF ($Q_req > 0) THEN
109         smer=($QP_set(11+a+1)-$QP_set(11+a))/
           ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
110         Qlim = $QP_set(11+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
111     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
112         smer=($QP_set(21+a+1)-$QP_set(21+a))/
           ($QP_set(1+a+1)-$QP_set(1+a))
113         Qlim = $QP_set(21+a) + ($P_out - $QP_set(1+a)) * smer
114     ELSE
115         Qlim = 0
116     ENDIF
117 ELSEIF ($QP_set(1) >= 2 .and. $P_out >
           $QP_set(int($QP_set(1)))) THEN
118     ! nad nejvyssim P(pu) - "ochrana" pred merenim P > 1
119     a=int($QP_set(1))-1
120     IF ($Q_req > 0) THEN
121         Qlim = $QP_set(11+a+1)
122     ELSEIF ($Q_req < 0) THEN
123         Qlim = $QP_set(21+a+1)
124     ELSE
125         Qlim = 0
126     ENDIF
127 ELSE
128     Qlim = 0
129 ENDIF
130

```



```
131 $limit = Qlim
132 $Q = Qlim * $Q_req
```

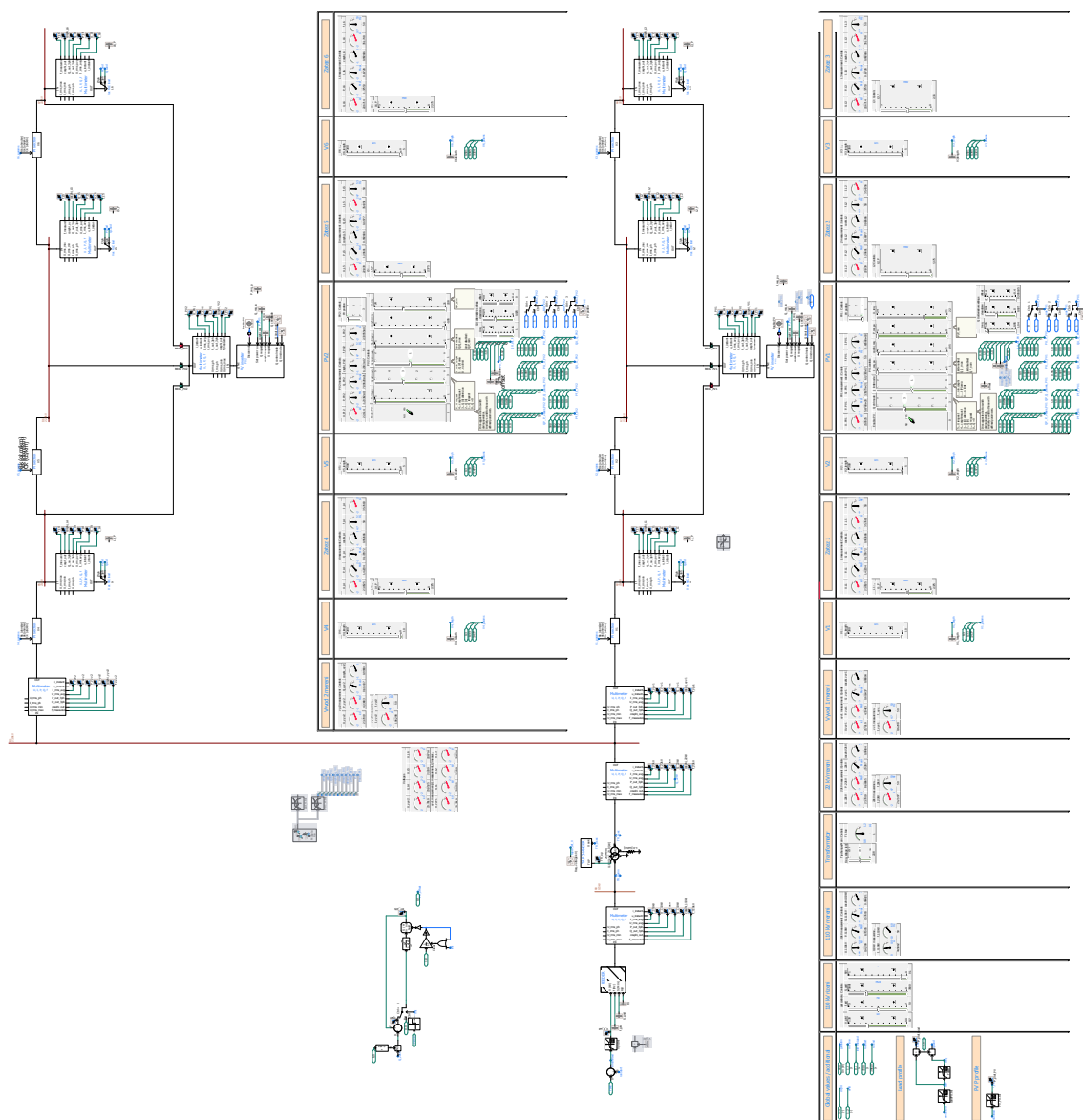
## D Skript pro modul alternativního zadání $Q(U)$

Výpis D.1: Skript pro modul alternativního zadání  $Q(U)$

```
1 #BEGIN
2   $OUT=0.0
3   ! inicializace pro t=0.0
4 #ENDBEGIN
5 #LOCAL REAL smer, X2, X4, Y24, Xlim1, Xlim2
6 smer=0
7
8 Y24=$set(7) ! offset
9 X2lim=$set(1)+(Y24-$set(2))/$set(8) ! limit necitlivosti pri
   offsetu pro podpeti
10 X4lim=$set(3)+(Y24-$set(4))/$set(8) ! limit necitlivosti pro
   offsetu a nadpeti
11 X2=$set(5)-$set(6) ! bez limitu
12 X4=$set(5)+$set(6) ! bez limitu
13
14 ! kontrola, zda se body nenachazi mimo vymezenou oblast
15 IF (X2lim > X2) THEN
16   X2 = X2lim
17 ELSEIF (X4lim < X4) THEN
18   X4 = X4lim
19 ENDIF
20
21
22 IF ($IN <= $set(1)) THEN
23   $OUT = $set(2)
24   ! vystup je Y1 pokud IN je pod X1
25 ELSEIF ($IN >= $set(1) .and. $IN <= X2) THEN
26   smer = (Y24 - $set(2)) / (X2-$set(1))
27   $OUT = $set(2) + ($IN - $set(1)) * smer
28   ! mezi body X1 a X2
29 ELSEIF ($IN > X2 .and. $IN < X4) THEN
30   $OUT = Y24
31   ! mezi body X2 a X4 (v oblasti necitlivosti)
32 ELSEIF ($IN >= X4 .and. $IN <= $set(3)) THEN
33   smer = ($set(4) - Y24) / ($set(3) - X4)
34   $OUT = Y24 + ($IN - X4) * smer
35   ! mezi body X4 a X5
36 ELSEIF ($IN >= $set(3)) THEN
```

```
37     $OUT = $set(4)
38     ! vystup je Y5 pokud IN je nad X5
39 ELSE
40     $OUT = 0
41 ENDIF
```

## E Model soustavy v PSCADu



Obr. E.1: Model soustavy v PSCADu

## F Obsah elektronické přílohy

Tab. F.1: Obsah elektronické přílohy

Popis	Název souboru
Model sítě v PSCADu	Sit.pscx
Soubor s nastavením FVE pro UCH	PV_UCH.txt
Soubor s nastavením zátěží pro UCH	zat_UCH.txt
Soubor s profilem napětí	Ugrid.txt
Soubor s profilem zatížení	LoadPU.txt
Soubor s profilem výkonu výroby	PV_PU.txt